

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Акустики та акустoeлектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **Дідковський В.С.**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____ **6.050803 Акустотехніка**
(код та назва спеціальності)

на тему: Дослідження шляхів підвищення енергоефективності
п'єзоелектричних віброгенераторів напруги

Виконала: студент 4 курсу, групи ДГ-51
(шифр групи)

Максимець Максим Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ д. т. н., професор Артеменко М.Ю.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ акустики та акустoeлектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 6.050803 Акустотехніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

_____ Максимець Максим Олексійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження шляхів підвищення енергоефективності п'єзоелектричних віброгенераторів напруги _____

керівник проекту (роботи) _____ д. т. н., професор Артеменко М.Ю. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Об'єкт дослідження – процес перетворення енергії вібрацій в електричну енергію з використанням п'єзоелектричного ефекту _____

4. Предмет дослідження – генератори напруги які працюють на п'єзоелектриці, способи дослідження оптимізації та підвищення їх енергоефективності

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) дослідження способів перетворення механічної енергії в електричну.
- 2) дослідити схемні моделі та параметри п'єзоелектричних генераторів напруги;
- 2) розробити способи їх оптимізації з метою отримання максимальної вихідної потужності при максимальній напрузі;

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація Power Point

7. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання 03 жовтня 2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір матеріалів для роботи. Аналіз науково-технічної літератури.	03.10.2018 - 15.01.2017	
2	Дослідження схемних моделей п'єзоелектричного віброгенератора	16.01.18 - 03.02.17	
3	Оптимізація параметрів та роботи генераторів	04.02.17 - 24.03.18	
4	Дослідження напрямів вдосконалення п'єзоелектричних віброгенераторів	25.03.18 - 29.05.18	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації.	24.05.2018 - 04.06.2018	

Студент _____
(підпис)

М.О.Максимець _____
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

М.Ю.Артеменко _____

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Дослідження шляхів підвищення енергоефективності п'єзоелектричних віброгенераторів напруги // Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр». Максимець М.О. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-51. – К.:НТУУ «КПІ», 2019.

Актуальність теми. Людство, з кожним роком, споживають все більше енергії, кількість населення росте, а з ним і енерговитрати, тому саме цей природний ресурс є одним із важливіших, у наш час. Над цією проблемою завжди працюють велика кількість людей, до того ж нас оточує безліч невичерпних джерел живлення. Одним із приладів що збирають енергію є харвестер, що черпає енергію зі звичайної вібрації. Ці механізми представляють великий інтерес для багатьох дослідників, оскільки п'єзоелектричні перетворювачі здатні генерувати електричну напругу із різними методами, такими як тепловий, електричний, механічний і електромагнітний. До того ж вони мають великий термін служби, можуть замінити звичайні акумулятори, та не мають відходів,

Метою роботи є дослідити п'єзоелектричний матеріал та явище п'єзоефекту, проаналізувавши який матеріал п'єзоелектрики буде краще для використання різних генераторів, пошук шляхів підвищення енергоефективності генераторів напруги, оптимізувавши його для отримання максимальної потужності, при мінімальній напрузі.

Ключові слова: відновлювальна енергія, п'єзокераміка, вібрація, п'єзоелектричний віброгенератор, п'єзоелектричний ефект, біморф, кантилевер, харвестер.

ABSTRACT

Investigation of ways to increase the energy efficiency of piezoelectric voltage vibro generators // Graduate work for obtaining the degree of higher education "Bachelor". Maximets M.O. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky ", Faculty of Electronics, Department of Acoustics and Acoustoelectronics, Group ДГ-51. - K.: NTUU "KPI", 2019.

Actuality of theme. Every year, humanity consumes more and more energy, the population grows, and with it energy, so this particular natural resource is one of the most important in our time. A large number of people always work on this problem, besides, we are surrounded by many inexhaustible sources of power. One of the devices that collect energy is a harvester that extracts energy from normal vibration. These mechanisms are of great interest to many researchers since piezoelectric transducers are capable of generating electrical voltage with different methods such as thermal, electrical, mechanical and electromagnetic. In addition, they have a long life, can replace conventional batteries, and have no waste,

The purpose of the work is to investigate the piezoelectric material and the piezoelectric phenomenon, analyzing what kind of piezoelectric material would be better for using different generators, finding ways to increase the energy efficiency of voltage generators, optimizing it to obtain maximum power, with minimal voltage.

Key words: renewable energy, piezoceramic, vibration, piezoelectric vibration generator, piezoelectric effect, bimorph, cantilever, harvester.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ I. ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ СПОСОБОМ.....	11
1.1. Види генерації енергії.....	12
1.2. Генерація електричної енергії за рахунок перетворення механічної енергії.....	13
1.2.1. Перетворення механічної енергії електростатичним способом.....	16
1.2.2. Перетворення механічної енергії електромагнітним способом.....	18
1.2.3. П'єзоелектричний метод генерації електричної енергії.....	27
1.3. Порівняння методів перетворення механічної енергії в електричну.....	29
1.4. П'єзоелектричні матеріали.....	33
Висновки до розділу 1	35
 РОЗДІЛ II. МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НАПРУГИ.....	35
2.1. Режими п'єзоелектричного матеріалу	35
2.2. Режими вібрації кантилеверної балки.....	39
2.3. Покращення вихідної потужності п'єзоелектричних генераторів з використанням багатошарових структур.....	39
Висновки до розділу 2	43
 РОЗДІЛ III. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЕЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ.....	44
3.1. Схематична модель харвестерів та енергетичний баланс системи.....	47
3.2. Електромеханічні коефіцієнти зв'язку та загасання.....	48
3.3. Виведення вихідного імпедансу	51
3.4. Розрахунок вхідної та вихідної потужності.....	53

3.5 Експериментальна перевірка результатів моделювання.....	57
Висновки до розділу 3	57
 ВИСНОВКИ	 58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

MEMS – мікроелектромеханічні системи

PZT – цирконат-титанат свинцю

ПН – перетворювач напруги

ГН – генератор напруги

ПЕ – п'єзоелектричний ефект

ВСТУП

В останні роки великий інтерес дослідників викликає безвідходні, екологічно чисті способи отримання електричної енергії з різних видів природних відновлюваних джерел, таких як сонячне світло, вітер, морські приливи, геотермальна енергія та ін. Такі джерела є потужними, практично невичерпними, але у них є недоліки: вони періодичні в часі або стаціонарні в просторі (сонячного світла немає вночі, геотермальна енергія доступна тільки там, де існує вулканічна активність). В результаті такої енергії потрібно накопичувати і транспортувати, і є місця, в яких вироблена в такий спосіб електрична енергія недоступна.

Винахідники досі шукають заміну звичайним батареям і невеликим акумуляторам з низьким енергоспоживанням. Запропоновано різні рішення цієї нагальної проблеми. Пріоритетом для живлення мобільних телефонів і ноутбуків є літій-іонні батареї малого розміру. Однак ресурс усіх цих типів джерел зазвичай обмежений. Крім того, звичайні батареї, які людство викидає серед іншого побутового сміття, забиває близько 20 квадратних метрів землі або 400 літрів води важкими металами, такими як цинк, марганець, кадмій, нікель, ртуть та інші. Навіть у досить численних дозах вони можуть завдати шкоди здоров'ю людини. Адже під впливом повітря і опадів, металеве покриття батареї починає роз'їдатись. В результаті метали, з яких формується батарея, потрапляють у ґрунт, а через неї - в підземні води. Тому були зроблені спроби зменшити енерговитрати датчиків і перетворювачів, що входять до складу вимірювальної системи, а також створити батареї і акумулятори довговічного використання за допомогою джерел супутньої розсіяної енергії, та допомогти зберегти наше навколишнє середовище.

П'єзоелектричне збирання енергії існує вже близько десяти років, щоб генерувати енергію від навколишніх коливань[2]. Хоча генерується потужність дуже мала, але є кілька способів збільшення генерованої потужності. Так з'явилися різні підходи до моделювання генератора напруги. Математична модель має бути максимально простою, але в той же час достатньо точною, щоб

охопити найважливіші явища, необхідні для представлення і прогнозування фізичної динаміки системи.

П'єзоелектричний ефект дуже корисний у багатьох додатках, які передбачають виробництво та виявлення звуку, генерацію високих напруг, генерацію електронних частот, мікробаланс та надтонке фокусування оптичних приладів. Він також є основою ряду наукових інструментальних методів з атомною роздільною здатністю, таких як скануючі зондові мікроскопи (STM, AFM і т.д.). П'єзоелектричний ефект також має своє застосування і в більш земних додатках, наприклад, як джерело запалювання для запальничок. . Цей перспективний спосіб живлення малих електронних компонентів і дистанційних датчиків приваблює дослідників і дизайнерів з різних галузей, включаючи механічну, аерокосмічну, електротехнічну і цивільну, а також дослідників з галузі матеріалознавства[3].

РОЗДІЛ І. ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ СПОСОБОМ

1.1. Види генерації енергії

Генерація енергії - виробництво електроенергії (електричної напруги і струму) шляхом перетворення її з інших видів енергії через спеціальні технічні пристрої.

Існують такі види генерації відновлюваної енергії: сонячна батарея або фотоелемент - електронний пристрій, який перетворює енергію електромагнітного випромінювання, головним чином світла, в електричну енергію;

- Хімічні джерела струму - джерела електричної енергії, яка виробляється шляхом перетворення хімічної енергії в електричну.
- Радіоізотопні джерела енергії;
- Електричний генератор - пристрій, призначений для перетворення енергії механічного руху на енергію електричного струму.

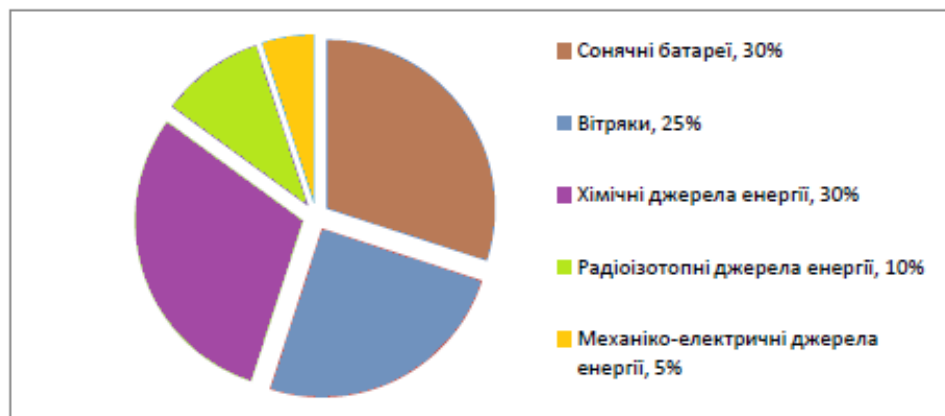


Рис.1.1. Способи генерації відновлюваної енергії

Серед видів відновлюваної енергії тільки механічна енергія вимагає мінімальних фінансових витрат на виготовлення та встановлення утилізаційних пристроїв, вона постійно активна, пристрої перетворення енергії з механічної в електричну форму мають максимально тривалий термін служби і не створюють екологічних проблем[1]. Питома вага перетворювачів механічної енергії в електроенергію становить 5% від відновлюваної енергії.

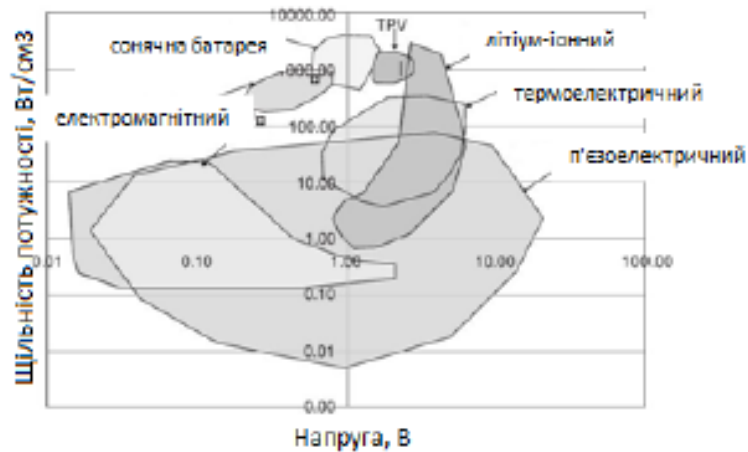


Рис.1.2. Залежність щільності потужності від напруги для різних перетворювачів енергії

Як ми бачимо на рис.1.2, що п'єзoeлектричний пристрій порівняно з іншими джерелами живлення має найбільшу вихідну потужність, оскільки необхідний рівень напруги може бути отриманий безпосередньо з п'єзoeлемента. У п'єзoeлектричному пристрої вхідна напруга або заряд повинні застосовуватися для створення відносного коливального руху елементів конденсатора і для отримання змінного струму на виході. Крім того, при такому перетворенні енергії вихідна напруга визначається властивостями матеріалу, що виключає необхідність використання зовнішнього джерела напруги.

П'єзoeлектричне збирання енергії існує вже близько десяти років, щоб генерувати енергію від навколишніх коливань. Хоча генерується потужність дуже мала, але є кілька способів збільшення і збільшення генерованої потужності.[5]

1.2. Генерація електричної енергії шляхом перетворення механічної енергії

Механічна енергія є одним з видів розсіяної енергії, що проявляється у взаємодії, русі окремих тіл або частинок, що оточують всюди – таких як, вібрація рейки поїздів при його русі, взаємодія взуття людини з землею, при ходьбі та бігу, навіть сила серцебиття можна використовувати для отримання електричної енергії, яка так необхідна в нашому житті[1]. Ці джерела енергії, потужність яких відносно мала, можуть використовуватися в різних сферах промисловості, таких як: військова сфера (як для безпілотних літальних апаратів,

так і портативних пристроїв), біомедичні технології(де енергія може бути зібрана з незмінного п'єзоелектричного пристрою і використовується для реалізації систем доставки ліків або тактильних датчиків), можливість заміни вичерпних батарей та джерел живлення в малопотужних системах (в яких наявні відповідні витрати на технічне обслуговування, перевірку та заміну батарей).[3] Останні дослідження також включають перетворення енергії з оклюзійного контакту під час жування за допомогою п'єзоелектричного шару та від ударів серця

1.2.1. Перетворення механічної енергії електромагнітним способом

Електромагнітний тип перетворення є одним з найбільш поширених. Генератори перетворюють механічну енергію в електричну. Для роботи генератора необхідно обертати його валом будь-яким двигуном. Наприклад, на автономному локомотиві, генератор приводиться в дію дизельним двигуном, на гідроелектростанції – гідравлічною турбіною, на тепловій електростанції – паровим двигуном (парова турбіна), яка використовує кінетичну енергію пари.

Принцип роботи будь-якої електричної машини заснований на використанні явищ електромагнітної індукції і виникненні електромагнітних сил при взаємодії провідників зі струмом і магнітним полем[11].

Принцип роботи електричного генератора. Генератор електричного струму в основному складається з двох частин: рухомої — ротора та нерухомої — статора. Однією з частин генератора є індуктор, що слугує для створення магнітного поля, між якими обертається якор, на який намотані обмотки, з яких знімається електричний струм. Для створення магнітного поля використовуються постійні магніти, або електромагніти.

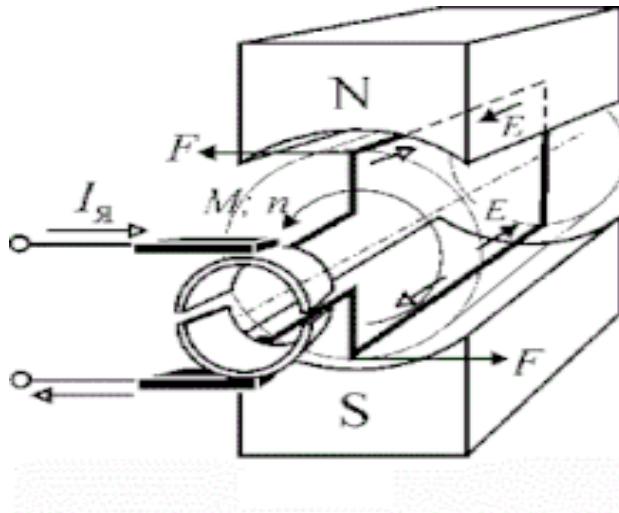


Рис.1.3. Принципова схема електричного генератора

Будемо вважати, що якір обертається з постійною швидкістю в напрямку проти годинникової стрілки. Так як провідники знаходяться в однакових умовах щодо полюсів, то досить розглянути процес створення ЕРС тільки в одному провіднику.

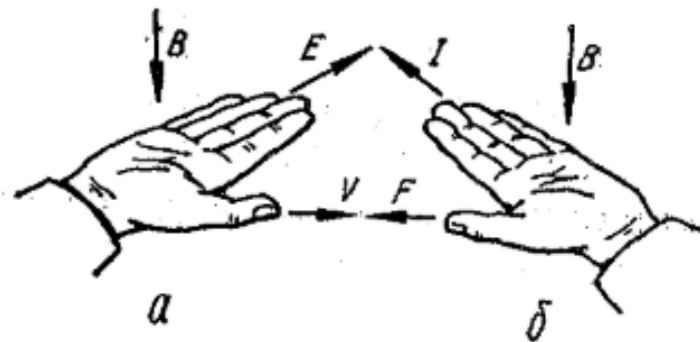


Рис.1.4. Правило лівої та правої руки

Напрямок ЕРС визначається за правилом правої руки. Долоню правої руки треба розташувати в магнітному полі так, щоб магнітні силові лінії були спрямовані в долоню, а великий палець був відведений на 90° в площині долоні і спрямований в бік руху провідника. Тоді решта пальців руки покажуть напрямок наведеної в провіднику ЕРС (рис 1.4.а). Нагадаємо, що прийнято вважати магнітні силові лінії виходять із північного полюса[5]. Якщо підключити приймач електричної енергії до обмотки анкера, то через замкнутий контур буде протікати електричний струм. У провідниках обмотки якоря струм I буде спрямований так само, як і ЕРС e .

Напрямок струму визначаємо за правилом лівої руки (рис 1.4.б), на провідник розташованому під південним полюсом, буде діяти сила F , що спрямована вліво. Провіднику, розташованому під північним полюсом відповідає сила F , спрямована вправо. Ці сили створюють разом електромагнітний момент M , що спрямований за годинниковою стрілкою. Також момент M , що виникає при віддачі генератора електричної енергії, спрямований в напрямку, протилежному обертанню провідників, тому він є гальмівним моментом, який намагається уповільнити обертання якоря. Щоб запобігти його зупинці, до валу якоря необхідно прикласти зовнішній крутний момент $M_{\text{вн}}$, що протилежний моменту M та рівний йому за значенням. Враховуючи тертя і інші внутрішні втрати в системі, зовнішній крутний момент повинен бути більше, ніж електромагнітний момент M , що генерується струмом навантаження генератора. Отже, щоб продовжити нормальну роботу генератора, необхідно до нього ззовні підвести механічну енергію – тобто, обертати якір генератора будь-яким двигуном. Режим холостого ходу генератора наявний тільки за відсутності навантаження (при відкритому зовнішньому контурі генератора). У цьому випадку, від турбіни або дизеля потрібна та кількість механічної енергії, що необхідна для подолання тертя і компенсації інших внутрішніх втрат в генераторі.[7] При збільшенні навантаження генератора, збільшується струм I , що проходить провідниками обмотки якоря, та гальмівний момент M , що генерується ним. Тому для продовження нормальної роботи генератора, має бути збільшена також механічна потужність $P_{\text{мх}}$, яку генератор повинен отримати від дизеля або турбіни,

У висновку отримаємо, що електромагнітні пристрої можуть використовуватися в технологіях мікроелектромеханічних систем (МЕМС), де будуть використовуватися мікро-турбіни, але вони вимагають як складної конструкції, так і палива.[11]

1.2.2. Перетворення механічної енергії електростатичним способом

Прилади, що мають принаймні дві поверхні, між якими діє електричне поле, називаються електростатичними перетворювачами. Електричне поле створюється ззовні прикладеною напругою або при дії на вхід перетворювача вимірювального сигналу. Основою всіх електростатичних пристроїв є електростатичні вимірювальні механізми.

Електростатичні пристрої мають ряд особливостей, які є перевагами перед пристроями інших систем. Наприклад, такі як: невеликі витрати потужності від джерела напруги, висока точність приладу; використання в широкому частотному діапазоні (від 20 Гц до 35 МГц); [12] вимірювання високої напруги (до 300 кВ), без застосування трансформаторів напруги; несуттєва залежність отриманих значень від частоти і форми кривої напруги.

Основними недоліками приладу є: низька чутливість, невелике значення крутного моменту, нерівномірна шкала, тощо.

Принцип роботи електростатичних перетворювачів оснований на взаємодії електричних полів систем пластин, що мають протилежні заряди. Рухома система пластин переміщується відносно фіксованої системи, що є результатом взаємодії, та викликаючи відхилення відлікової стрілки на шкалі приладу, яка пов'язана з рухомою частиною перетворювача[9]. Зміна ємності викликає переміщення рухомої частини перетворювача відносно фіксованої.

Всі існуючі електростатичні перетворювачі можна розділити на два типи: перетворювачі, які зманюють ємність за рахунок зміни відстані між пластинами (рис. 1.4, а), і перетворювачі, у яких зміна ємності досягається за рахунок зміни активної площі взаємодіючих пластин(рис.1.4,б).

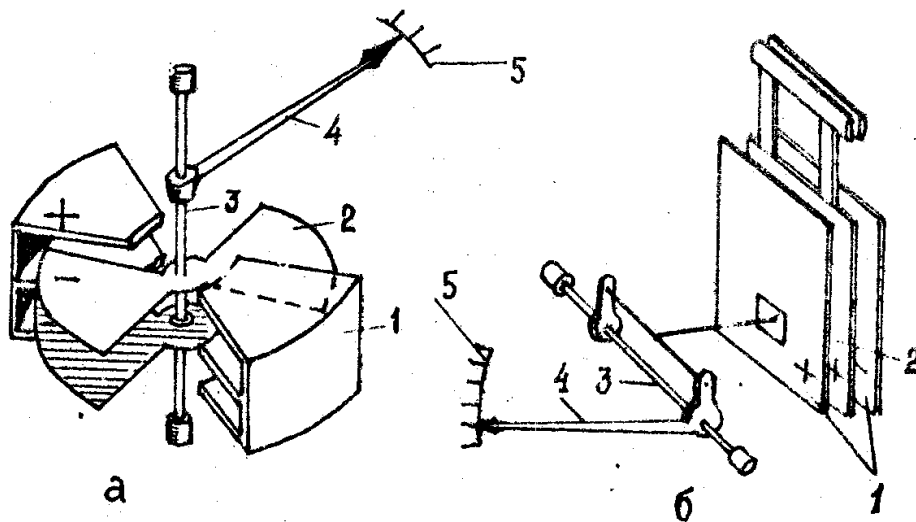


Рис.1.4. Електростатичні перетворювачі

Рухомі частини перетворювача (рис. 1.4, а) зі змінною активною зоною складаються з однієї або декількох тонких алюмінієвих пластин 1, на нерухомій осі частини 2, утвореної однією або кількома камерами, що складаються з металевих пластин, з повітряним зазором між ними. Збільшення кількості камер і променів у мобільних дисках призводить до підвищення чутливості перетворювача. Форма рухомих і нерухомих панелей вибирається на основі необхідності забезпечення рівномірного характеру шкали приладу[5]. Подача вимірювальної напруги на пластини, вони отримують протилежні заряди, в результаті чого вони отримують різнойменні заряди, що приводить до виникнення електростатичного притягання. В наслідку рухомі пластини повертатимуться, намагаючись потрапити всередину камер. Вісь 3, разом із закріпленою лічильною стрілкою, буде повертатися з рухомими пластинами. Водночас, пружні елементи закручуючись, будуть генерувати протидіючий момент. При рівній кількості крутних і протидіючих моментів – рухома частина зупиниться. Для одержання необхідного часу заспокоєння в вимірювальних механізмах є спеціальний конструктивний елемент - заспокоювач, що створює момент заспокоєння, величина якого пропорційна швидкості обертання рухомої частини. Застосовуються переважно повітряні, магнітоіндукційні та рідинні заспокоювачі.[10] Щоб збільшити чутливість пристрою використовують рухома частину закріплену на розтяжках і світловий відлік, оскільки обертовий момент

в даних перетворювачах не великий. В результаті знижується інерція рухомої частини і маса.

Електростатичні перетворювачі в яких потужність змінюється шляхом зміни відстані між пластинами(рис.1,4,б), фіксована частина сформована двома пластинами , між якими знаходиться підвішена рухома пластина 2, що гальванічно з'єднана з одною фіксованою пластиною та відокремлена від іншої. Якщо подати напругу на рухому та ізолювану фіксовану пластину, рухлива пластина почне притягатися до зарядженої різнойменними зарядами ізолюваної нерухомої пластини і одночасно відштовхуватися від однойменно зарядженої нерухомою пластини. Тяга і міст 3 створюють переміщення рухомої пластини в наслідок чого ось 6, із закріпленою на ній стрілкою 4,будуть повертатись. При цьому маса рухомої пластини почне створювати протидіючий момент.

1.2.3. П'єзоелектричний метод генерації електричної енергії

П'єзоелектричний ефект - це здатність деяких матеріалів генерувати електричний заряд у відповідь на прикладені механічні напруги, виникнення електричних зарядів (п'єзоелектрики) на гранях деяких кристалів при їхній деформації , або навпаки — виникнення деформації цих кристалів внаслідок дії електричного поля.

П'єзоелектричний перетворювач – пристрої, що використовують п'єзоелектричний ефект в кристалах, кераміці або плівках і перетворюють електричну енергію в механічну і навпаки.[2] Одним з видів пристроїв, що збирають розсіюючу енергію, є так звані "**харвестера**" (від англ. "Harvester" - комбайн, машина для уборки урожаю) - технологічні пристрої, що збирають електричну енергію з масиву елементів, що перетворюють енергію будь-якого виду в електричну, та накопичують її. Це генератор який працює на основі п'єзоелектричного ефекту.

П'єзоелектрика це форма зв'язку механічної та електричної поведінки кераміки і кристалів. Ці матеріали демонструють п'єзоелектричний ефект, який історично поділяється на два явища - *прямий* і *зворотний* п'єзоелектричні ефекти.

Прямий п'єзоелектричний ефект (рис. 1.5) був вперше побачений у 1880 році і був представлений братами П'єром і Жак Кюрі[6]. П'єзоелектричний матеріал (керамічний або кристалічний) поміщають між двома металевими пластинами. Для генерації електричного заряду необхідно докласти механічне зусилля (стиснути або розтиснути). При додатку механічного зусилля на металевих пластинах починає накопичуватися електричний заряд.

За прямого п'єзоефекту величина поляризованості прямо пропорційна величині деформації,

$$P = ex \quad (1.1)$$

Де коефіцієнт e – це п'єзомодуль деформації), x - механічна деформація

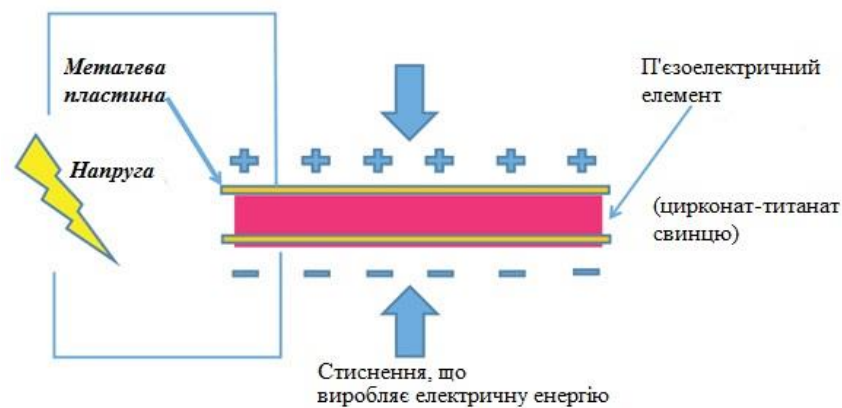


Рис. 1.5 Прямий п'єзоелектричний ефект

Таким чином, п'єзоелектричний ефект діє як мініатюрний акумулятор. мікрофони, датчики тиску, гідролокатори і інші чутливі пристрої використовують цей ефект для своєї роботи.

Вище згадувалося, що існує і зворотний п'єзоелектричний ефект (рис.1.6). Він полягає в тому, що при дії електричної напруги на п'єзоелектричний кристал відбудеться механічна деформація, під якою він буде розширюватися або стискатися, при цьому величина механічної деформації пропорційна поляризованому полю. Також математично є наслідком основного принципу термодинаміки Г. Ліппмана, який він сформулював у 1881 році і експериментально підтвердив братами Кюрі в тому ж році[4].

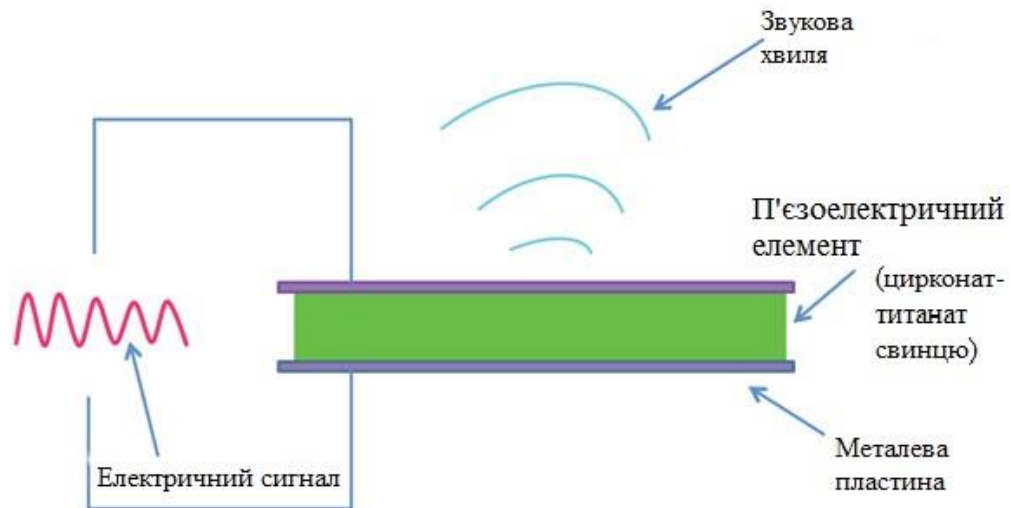


Рис. 1.6 Зворотний п'єзоелектричний ефект

Величина деформації кристала лінійно змінюється зі зміною величини поля:

$$x = dE, \quad (1.2)$$

де d – ще один п'єзомодуль, E - електрична полярність

Зворотний п'єзоелектричний ефект значно допомагає при розробці акустичних пристроїв.[2] Прикладом можуть послужити звукові колонки, сирени, дзвінки. Переваги таких динаміків в тому, що вони дуже тонкі, а це робить їх практично незамінними при використанні в дрібних пристроях, наприклад, в мобільних телефонах. Також цей ефект часто використовують медичні ультразвукові та гідроакустичні датчики.

Важливо відзначити, що в п'єзоелектричному матеріалі ці два ефекти зазвичай присутні одночасно. Тому, якщо розглядати проблему, в якій прямий п'єзоелектричний ефект має першочерговий інтерес (наприклад, у випадку енергії від коливань), ігнорування зворотного п'єзоелектричного ефекту може бути термодинамічно некоректним.

Найбільш широко використовуваним в технічних застосуваннях є п'єзокерамічний тип PZT.[4] Ця кераміка була розроблена в Токійському технологічному інституті в 1950-х роках. Різні склади цього п'єзокераміки (наприклад, PZT-5A і PZT-5H) найбільш поширені в даний час в технології.

Зв'язок між напругою і деформацією для загального матеріалу описується з використанням еластичних властивостей матеріалу. Але в п'єзоелектриці матеріал має додатковий ефект сильного електромеханічного зв'язку, який необхідно враховувати.

Перший закон термодинаміки (принцип збереження енергії) для лінійного п'єзоелектричного континуума представлено рівнянням (1.1):

$$\dot{U} = T_{ij} + \dot{S}_{ij} + E_i \dot{D}_i \quad (1.3):$$

де \dot{U} - щільність енергії, запасеної в п'єзоелектричному континуумі (диференціювання по часу);

T_{ij} - тензор напруги;

\dot{S}_{ij} - тензор деформації (диференціювання по часу);

E_i - тензор напруженості електричного поля;

\dot{D}_i - тензор електричного зміщення (диференціювання по часу).

П'єзоелектричний ефект з'єднує механічні рухи і електричну енергію в межах конкретних матеріалів. Як тільки п'єзоелектричний матеріал піддається тиском, він виробляє електрику. І навпаки, коли на п'єзоелектричний матеріал взаємодіє з електричним полем, він змінює форму, створюючи зміну напруги / деформації.[14] Починаючи з першого закону термодинаміки, для п'єзоелектричного лінійного континуума наведено рівняння:

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1.4)$$

$$D_i = e_{kij} S_{kl} + \epsilon_{ij}^S E_k \quad (1.5)$$

де c_{ijkl}^E модуль Юнга, e_{kij} - це п'єзоелектричний коефіцієнт, ϵ_{ij}^S є затиснутою діелектричною проникністю.

Верхній індекс вказує на постійне електричне поле (яке відповідає, наприклад, умові короткого замикання, де $E=0$), а також верхній індекс S стоїть за умови постійної деформації. Індекс D означає, умови постійного електричного зміщення, а індекс T – постійна напруга.

Всі інші еквівалентні системи рівнянь стану з різними граничними умовами виражаються наступним чином:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (1.6)$$

$$D_i = d_{kij} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (1.7)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{kl} + g_{kij} D_k \quad (1.8)$$

$$E_i = -g_{ikj} T_{kl} + \beta_{ik}^T D_k \quad (1.9)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^D S_{kl} - h_{kij} D_k \quad (1.10)$$

$$E_i = -h_{ikl} S_{kl} + \beta_{ik}^S D_k \quad (1.11)$$

$d_{kij}, g_{kij}, h_{kij}$ - альтернативні п'єзоелектричні сталі;

s_{ijkl}^E, s_{ijkl}^D - сталі податливості пружності;

$\beta_{ik}^T, \beta_{ik}^S$ - сталі діелектричної проникності.

Залежно від конкретних граничних умов одна з цих систем може бути кращою заради спрощення.

Генератори на основі п'єзоелектрики. Основною частиною генератора п'єзоелектричної енергії є п'єзоелектричний елемент (керамічний або полімерний). В якості механізмів перетворювача використовують тонкі мембрани або консольні балки з п'єзокристалів. Коли кристали зазнають механічні напруги під дією кінетичної енергії вібрації, через п'єзоелектричний ефект виникає невелика електрична напруга.[10] Ці прилади, як правило, прості та відомі своїм тривалим терміном служби.



Рис.1.7. Схема принципу роботи п'єзоелектричного віброгенератора

Існує декілька конструкцій харвестерів для збору енергії, розглянемо деякі із них.

П'єзоелектричний генератор у вигляді тришарового кантилевера, дана конструкція складається з двох шарів п'єзокераміки і металевої центральної прокладки (рис 1.8). П'єзоелектричні елементи складаються з двох однакових п'єзоелектричних пластин. Формують консольний п'єзоелектричний генератор за допомогою п'єзоелектричної кераміки, електрода, еластичної підкладки і нерухомої опори. П'єзоелектрична кераміка покриває і щільно інтегрується з підкладкою, а покриття електрода на п'єзоелектричній кераміці. Один кінець генератора кріпиться до опори, інший кінець вільно вібрує з джерелом вібрації. При виникненні стійкого збудження п'єзоелектрична кераміка генерує заряд, який переміщується і деформується за допомогою джерела вібрації, і постійний опір струму вихідного струму генерується при опорі навантаження, отже, механічна енергія вібрації переводиться в електричну.

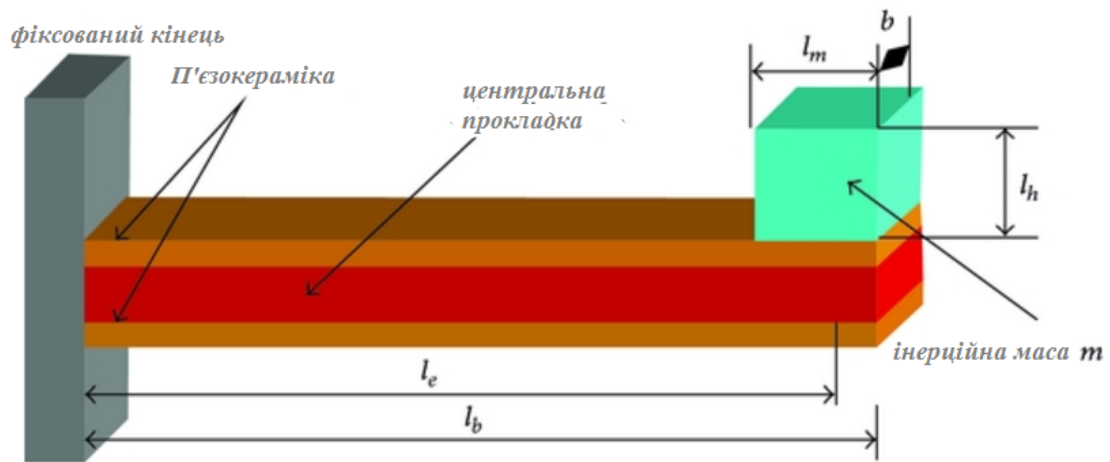


Рис.1.8. Типова консольна тришарова балка

П'єзоелектричний генератор з кільцевим діафрагмним кріпленням. Цей тип генератора дуже схожий на конфігурацію кантилеверного типу генератора[12]. Для посилення п'єзоелектричну діафрагму у формі кільця, робиться тонкий круговий п'єзоелектричний диск, який потім з'єднується з металевим ущільнювачем, при притисненні краю, вібрація може забезпечити необхідну вібрацію для збудження п'єзоелектричного матеріалу. Як і в біморфному кантилеверному генераторі, інерційна маса може бути прикріплена до центру кругової діафрагми для забезпечення напруги в п'єзоелектричному матеріалі.

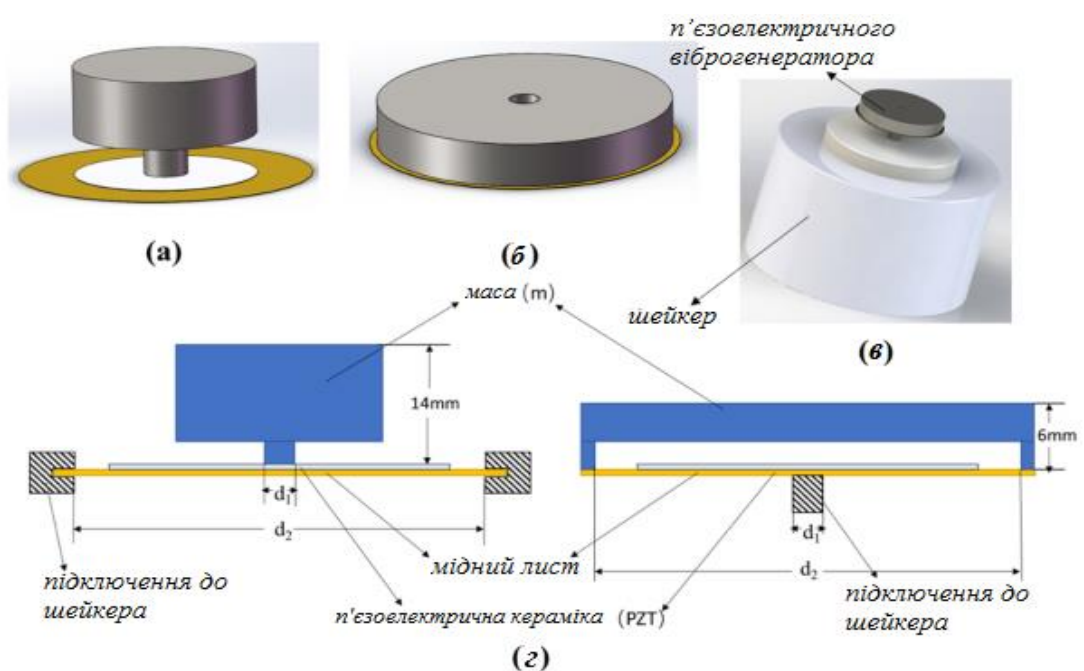


Рис.1.9 Структура двох п'єзоелектричних віброгенераторів з круговими діафрагмними кріпленнями;

Центральна структура - (а); Кільцева структура (б); Кільцевий комбайн з шейкером (в); Структурні параметри центрального комбайна і кільцевого комбайна (г).

Новий напружено-застосований режим на п'єзоелектричній енергії кругової діафрагми п'єзоелектричного генератора енергії складається з порожньої кільцевої маси(б), на відміну від старого (а), що складається з твердої маси[13]. На рис.1.9 показані відмінності між ними. Ці два види комбайнів зазвичай містять дві частини, масу і шматок кругової п'єзоелектричної діафрагми, що включає в себе п'єзоелектричну кераміку і мідний лист. Найбільшою відмінністю між старим і новим комбайнами є їхні різні режими навантаження. Поперечний переріз між старою масою і діафрагмою - це суцільне коло, тому ми називаємо цю центральну масу – новою кільцевою масою. Висота центральної маси становить 14 мм, а висота кільцевої маси - 6 мм. Змінюємо вагу маси, регулюючи її висоту. Таким чином, порівняно зі старим комбайном, новий має менший об'єм через більшу утилізацію простору. Тінями на рис. 1.9 (г) є гвинтами, що з'єднують енерго збиральну частину і шейкер.

Цей пристрій має циліндричну форму, обсяг якого становить $7,9 \text{ см}^3$. Гвинт, з'єднаний з нижньою поверхнею діафрагми, передає силу від вібратора до діафрагми.

Харвестер типу гнучка «тарілка»

Призначений для використання з силовими ударами.[9] Як правило, ці типи генераторів складаються з двох електричних металевих дисків і порожнистого металевого торцевого ковпачка на кожній стороні приводу.

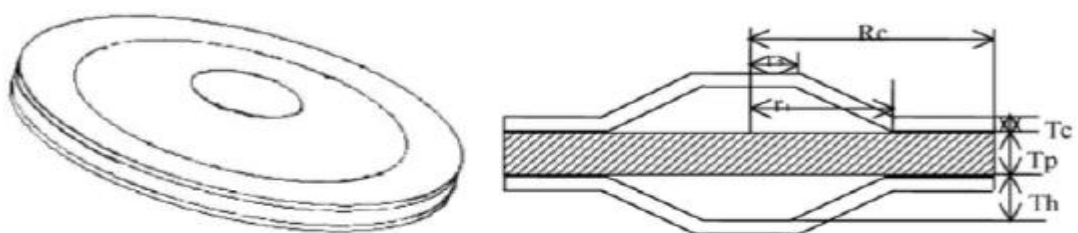


Рис.1.10. П'єзоелектричний віброгенератор типу «тарілки» в 3D і поперечному перерізі

Наявність порожнин дозволяє металевим торцевим заглушкам діяти як механічний трансформатор для перетворення радіального зсуву п'єзоелектричної кераміки в поздовжнє зміщення і посилення його, отже, і коефіцієнти п'єзоелектричного заряду d_{33} і d_{31} беруть участь у формуванні енергії генератора, отже значно більше переміщення S може бути отримано на генераторі. Важливим фактором для передачі енергії є постійне п'єзоелектричне поле і постійні п'єзоелектричні напруги. Тому для збільшення вихідної потужності необхідно збільшити множення цих факторів, і конструкція повинна бути такою, щоб віброгенератор витримував високі циклічні напруги, без отримання пошкоджень.

Діапазон вихідної потужності п'єзоелектричних вібраційних генераторів коливається від декількох кубічних метрів до декількох сотень кубічних метрів, а вихідна напруга до 5 В, яка сильно залежить від опору навантаження. Це вимагає створення додаткових електронних пристроїв для стабілізації та перетворення цієї напруги.[5]

Незважаючи на їх здатність генерувати високу напругу, найбільшим недоліком генератора типу тарілки, є їх низька чутливість до джерел навколишнього середовища через їх низькі вібрацій.

1.3. Порівняння методів перетворення механічної енергії в електричну

У п'єзоелектричних матеріалів основними перевагами є їх щільність потужності і простота використання. На відміну від електромагнітних, п'єзоелектричні пристрої можуть бути як в макромасштабі, так і мікромасштабі.

Генератори що працюють електромагнітним методом застосовують електромагнітні сили для руху вільних електронів у котушці магніту що

обертається. Тоді як п'єзоелектричний матеріал, є непровідним матеріалом, що не має вільних електронів, тому електрони не можуть вільно переміщатися по матеріалу. П'єзокераміка складається з кристалів, які мають багато "постійних" електронів, під дією зовнішніх сил, вони можуть лише трохи рухатись, тобто кристали деформуються.[13] Ці малі рухи електронів, створюють електрорушійну силу, виводячи зі стану рівноваги сусідні матеріали, яка буде підштовхувати та схиляти електрони до електродів кристалу п'єзоелектрики.

Між п'єзоелектричними та магнітними генераторами, які працюють схоже, все таки є відмінності. Для процесу зміни магнітного поля, електромагнітні генератори застосовують механічну енергію. Дане магнітне поле сформовує силу для переміщення вільних електронів. Тоді як у п'єзоелектричному генераторі, електричне поле кристала змінюється з середини, під дією рухів вільних електронів.

У кожного методу перетворення існують різні переваги та недоліки.

Електростатичний метод працює за рахунок двох пластин конденсатора, які рухаючись збуджують процес вироблення енергії, яка зберігається на пластинах конденсатора. За рахунок переходу виробленої енергії крізь зовнішнє навантаження, генерується електрична потужність. Метод індуктивного перетворення використовує котушку що рухається відносно магніту, створюючи напругу на котушці. Перетворення напруги, між поверхнями шару п'єзоелектрики відбувається за допомогою механічного напруження, яке розділяє заряд в п'єзоелектричному матеріалі.

Котушки, з великою кількістю витків і об'ємні магніти, що демонструють свою високо ефективність, не складно придбати. Індукційний принцип має високий вихідний струм який обумовлений низькою вихідною напругою (<1 В), але потребує ефективних випрямлячів та перетворювачів для підсилення, котрі забезпечують рівень напруги, який потрібний для живлення електроніки. При розробці приладів МЕМС [8], існують недоліки обумовлені слабкими властивостями планарних магнітів, обмежена амплітуда вібрацій та кількість оборотів плоских котушок.

Тільки принцип перетворення конденсатора може бути максимально ефективно використаний в технології мікроелектромеханічних систем (MEMS). Недоліком ємнісних генераторів є необхідність в початкової поляризації напруги або заряду. Електростатичний генератор має високий вихідний опір, через що значення вихідного струму обмежене, також вони мають найменшу щільність накопичення енергії. Практична максимальна енергетична щільність індуктивних генераторів значно вища порівняно з ємнісними генераторами, але нижче, ніж досягнута п'єзоелектричними генераторами.

Наразі найпростішим методом є п'єзоелектричний спосіб перетворення. Який не потребує численні додаткові компоненти. Вібращі перетворюються в електрику за допомогою дугового п'єзоматеріалу. Цей спосіб найкраще поєднується з технологією MEMS-процесів, за рахунок можливості використання тонких та товстих плівок матеріалу. П'єзоелектричний генератор може виробляти відносно високі вихідні напруги, але тільки при низьких електричних струмах. Цирконат-титанат свинцю (PZT),[4] найпоширеніший матеріал, схильний до тріщин, через свою крихкість, якщо він надмірно напружена. Отже, порівняно з іншими видами перетворення, найвищий практичний характер та максимальну щільність накопичення енергії у п'єзоелектричного перетворення енергії.

1.4.П'єзоелектричні матеріали

П'єзоелектричні матеріали є групою елементів, які можуть виробляти електрику, коли вони знаходяться під механічною деформацією. Є понад 200 п'єзоелектричних матеріалів, виготовлених з комбінацією різних матеріалів. Через їх різних п'єзоелектричних констант вони генерують різні напруги. Тому важливий вибір найбільш відповідного матеріалу для енергозбирального генератора.[5] П'єзоелектричний матеріал можна розділити на три різні групи: п'єзоелектрична кераміка, п'єзоелектричні полімери і п'єзоелектричні

монокристали. Як правило, п'єзоелектричні монокристали і кераміка мають кращі п'єзоелектричні властивості, але вони також жорсткі і крихкі до високих напружень, що робить їх непридатними для деяких видів енергозбиральних робіт.

П'єзоелектрична кераміка

П'єзоелектрична кераміка є одним з найбільш відомих матеріалів в області п'єзоелектрики та енергозбирання. Низька вартість, легшу систематизацію і кращі п'єзоелектричні властивості в порівнянні з іншими п'єзоелектричними матеріалами зробили їх кращим вибором в енергозберігаючих пристроях[4]. Титанат барію (BaTiO_3) був першою п'єзоелектричною керамікою, яка була виявлена в лабораторії; але пізніше цирконат-титанат свинцю, відомий як кераміка PZT, став найбільш популярною і поширеною керамікою при застосуванні п'єзоелектричної енергозбиральної техніки. Інші альтернативи також отримують певну увагу, де ефективність і продуктивність температури не є першими, але інші фактори, такі як гнучкість, легка вага і токсичність, відіграють важливу і вирішальну роль.

Наприклад, ніобат натрієвого калію відображає властивості, дуже ідентичні PZT без існування свинцю. PZT важливий через високу температуру Кюрі, що дозволяє працювати в широкому діапазоні, перш ніж втрачає ефект п'єзоелектрики. Протягом останніх декількох років широкий спектр цього матеріалу був змінений шляхом зміни їхнього хімічного складу, такого як PZT-5H і PZT5-A.

(Однією з переваг PZT кераміки є те, що їх властивості можуть бути поліпшені шляхом зміни співвідношення цинкана титанату.[2] Також змінюється повна нечутливість до вологості і атмосфери, цей матеріал вважається сприятливим матеріалом.)

<i>П'єзо-електричний матеріал</i> \ <i>Параметр матеріалу</i>	$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	$d_{31}(10^{-12} \text{ m/V})$	$s_{11}^E(10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})$	$\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$
PZT-2	260	-60	11.6	7.50
PZT-4	635	-123	12.3	7.50
PZT-5A	830	-171	16.4	7.75
PZT-5H	1470	-274	16.5	7.50
PAT-6A	730	-80	10.7	7.45
PZT-6B	386	-27	9.0	7.55
PZT-7A	235	-60	10.7	7.60
PZT-8	600	-93	12.0	7.60

Таблиця 1. Загальні параметри п'єзоелектричного матеріалу PZT.

П'єзоелектричні полімери

П'єзоелектричні полімери можна поділити на дві групи: об'ємні полімери і композитні полімери.

Об'ємні полімери є твердими полімерними плівками і мають п'єзоелектричний ефект за рахунок їх структурної орієнтації. Вони бувають напівкристалічні полімери і аморфні полімери. Для об'ємних полімерів існують дві основні зобов'язання, які повинні бути виконані для того, щоб матеріал мав можливість мати п'єзоелектричний ефект.[4] У першу чергу молекулярна структура полімеру повинна природно містити молекулярні диполі. По-друге, ці диполі можуть бути переорієнтовані всередині сипучого матеріалу і утримуватися в бажаному стані орієнтації.

Композитні полімери являють собою групу полімерного матеріалу з вбудованим неорганічним п'єзоелектричним матеріалом. Одна з важливості об'єднання п'єзоелектричної кераміки з полімерами полягає в досягненні переваг обох матеріалів, що включає більш високий коефіцієнт зв'язку і діелектричну проникність з кераміки і механічну гнучкість від полімерів[5] Ці типи композитних полімерів є кращими для акустичних пристроїв через низький акустичний імпеданс полімеру і меншу кількість паразитних режимів.

Важливість п'єзоелектричного матеріалу полягає в тому, що зміна матеріалу і виробництво нових елементів можуть допомогти підвищити напругу. Згідно з дослідженням Klimies, було проведено напругу нового розробленого п'єзоелектричного полімеру поліпропілен – поліетилен (PE – PP).[11] Цей полімер міг досягти напруги в три рази більше в порівнянні з матеріалом PVDF, а також проявив високу чутливість, надаючи миттєвий відгук напруги при застосуванні напруги до нього. Наступний графік був досягнутий під час цього дослідження, що показує, як напруга цього матеріалу відповідає збільшенню навантаження.

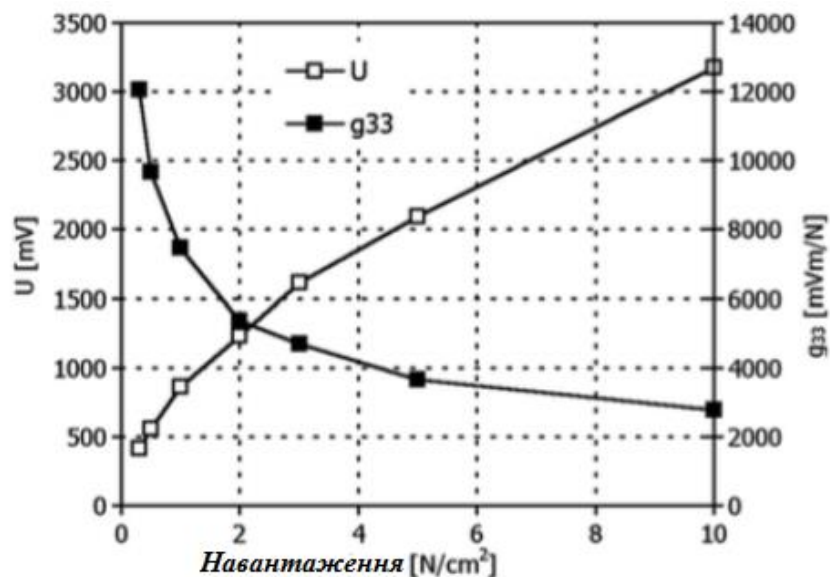


Рис.1.11. П'єзоелектрична напруга і величина g_{33} , як функція механічного напруження, що прикладається до п'єзоелектричного полімеру (PE – PP 11).

П'єзоелектричні монокристали

Як впливає з назви цієї групи матеріалів, п'єзоелектричні монокристали є аналогами п'єзоелектричної кераміки. Фероелектричні монокристали, такі як ніобат свинцю $[Pb(Ni1 / 3Nb2 / 3)O3]$ або PNN] і свинцево-титанат $[PbTiO3]$, є двома найбільш популярними та широко використовуваними матеріалами на основі їхньої продуктивності при збиранні п'єзоелектричної енергії. У цих матеріалах розташування позитивних і негативних іонів дуже впорядковане, що призводить до вирівнювання диполів по всьому матеріалу, що робить їх більш

п'єзоелектричними, ніж кераміка[4] Для пристроїв малого розміру фєроелектричні монокристали є сприятливими, оскільки вони мають більш високі модулі Юнга, ніж кераміка, що призводить до того, що матеріал має меншу резонансну частоту. Порівнюючи продуктивність монокристала PMN з керамікою, використали конфігураційну балку «unimorph».[12] У цьому експерименті п'єзоелектричний елемент розміром $10 \times 7 \times 1 \text{ mm}^2$ з резонансною частотою 900 Гц. Вихідна потужність цієї структури становила 4 мВт, тоді як для керамічного матеріалу - лише 0,2 мВт. Незважаючи на високу вихідну потужність п'єзоелектричного монокристалічного, вартість виготовлення такого матеріалу значно вища, ніж кераміка, що робить їх менш придатними для не дорогих виробів. Додаючи до недоліків монокристалів, їх необхідно також згадати, оскільки ці матеріали є крихкими в порівнянні з полікристалічними. Крім того, в порівнянні з їхніми полікристалічними аналогами, монокристалічні матеріали також легше втрачають п'єзоелектричні властивості при впливі високих електричних полів, які протилежні їхнім напрямкам.

Висновки до розділу 1

1. Останніми роками дослідження показали, що п'єзоелектрична генеруюча здатність в основному залежить від властивостей матеріалу, параметрів структури, базової частоти та методу стимулювання.

Серед видів відновлюваної енергії лише механічна енергія потребує мінімальних фінансових затрат на виготовлення та встановлення утилізуючих пристроїв, вона є постійно діючою, пристрої перетворення енергії з механічної в електричну форму мають максимально довгий термін служби і не створюють екологічних проблем. Питома вага перетворювачів механічної енергії в електричну складає 5% відновлюваної енергетики.

2. Існує три типи перетворення механічної енергії – електромагнітний (індукційний), електростатичний (ємнісний) та п'єзоелектричний. Основними перевагами п'єзоелектричних генераторів є:

- легкість застосування;
- високі питомі показники вихідної потужності;
- можливість зміни вихідної напруги підбором геометричних розмірів п'єзоелектричного матеріалу;
- невеликі розміри генератора.

3. Матеріалом п'єзоелементів віброгенераторів є п'єзоелектрична кераміка PZT-5A і PZT-5H. Одна з важливості об'єднання п'єзоелектричної кераміки з полімерами полягає в досягненні переваг обох матеріалів, що включає більш високий коефіцієнт зв'язку і діелектричну проникність з кераміки і механічну гнучкість від полімерів. Основним значенням п'єзоелектричних матеріалів для отримання енергії є велика роздільна потужність, яку можна отримати за допомогою них, а також простоту використання.[5] Другою перевагою п'єзоелектричних, по порівнянню з електромагнітними пристроями, є те, що вони можуть виконуватися як у мікромасштабі, так і в макромасштабі, завдяки добре розробленим технологіям виробництва тонких плівок та товстих плівок

Переваги і недоліки різних п'єзоелектричних матеріалів:

- Незважаючи на те, що кераміка є крихкою по відношенню до великої кількості деформацій серед п'єзоелектричних матеріалів, їхня висока вихідна потужність в порівнянні з іншими матеріалами робить їх спеціальними в п'єзоелектричних пристроях.
- Незважаючи на те, що п'єзоелектричні полімери мають найменший недолік вихідної потужності, вони є найбільш гнучкими з найменшим фактором зчеплення між п'єзоелектричними матеріалами.
- Гнучкість допомагає п'єзоелектричним матеріалам працювати при низьких вхідних частотах або при великій амплітуді збудження.
- Незважаючи на високу щільність монокристалів порівняно з іншими п'єзоелектричними матеріалами, їхня висока вартість виготовлення відіграє вирішальне значення в їх обмеженому використанні в енергозберігаючих пристроях.

РОЗДІЛ II. МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НАПРУГИ

2.1 Режими п'єзоелектричного матеріалу

Важливим для підвищення ефективності є моделювання п'єзоелектричного віброгенераторів напруги. Механічна конфігурація системи збирання також може підвищити вихідну потужність. Тому величезні зусилля були спрямовані на розробку різних моделей енергозберігаючих машин. Моделювання п'єзоелектричного комбайна включає в себе моделювання механічної конфігурації віброгенераторів, яка є структурою, на якій п'єзоелектричний елемент змонтований для вібрації. Також режими п'єзоелектричного матеріалу, який є напрямком механічного напруження, що наноситься на елемент, є частиною механічної структури п'єзоелектричних комбайнів.

У п'єзоелектричних матеріалах є два основних режими: поперечний режим (режим 3-1) або поздовжній режим (3-3 режим).[11] Напрямок механічного напруження (T), у поздовжньому режимі, паралельний електричному або поляризаційному напрямку (P) з відповідною резонансною частотою. Тобто коли напруга подається на п'єзоелектричний елемент в поздовжньому режимі - напруга стискається по осі абсцис, а напруга негативна.

В поперечному режимі, напрямок механічного напруження (T), перпендикулярно електричному або напрямку поляризації (P), з відповідною резонансною частотою. Тоді напруга яка подається на п'єзоелектричний елемент - стискається в напрямку осі z , а напруга позитивна, у поперечному режимі.

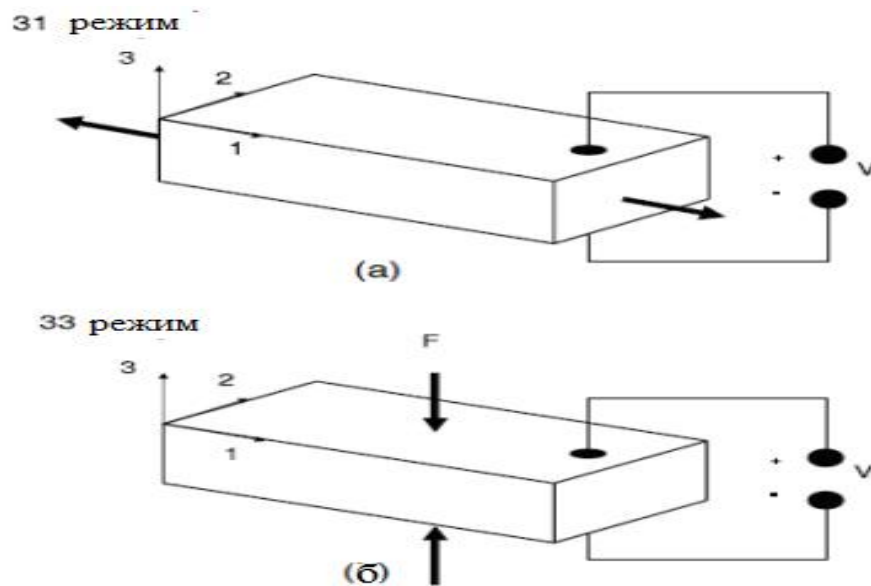


Рис.2.1. Поперечний (а) та поздовжній(б) п'єзоелектричний режим

Дослідження механічної до електричної енергії при збиранні п'єзоелектричної енергії показали, що поздовжній режим (3-3) в 3-5 разів показує кращу генерацію потужності, ніж поперечний режим (режим 3-1). Тим не менш, недоліком поздовжнього режиму є тверде виготовлення, а також його занадто жорсткий, щоб з'єднати механічну енергію в її структуру. Крім того, що коефіцієнт напруги в режимі (3-3) більший ніж в (3-1) режимі, що зумовлює більш високу вихідну енергію, а також великий зазор між електродами, що впливає на вихідну енергію. Однак у цьому режимі обмежуючим фактором є довжина п'єзоелектричного матеріалу[10].

Таблиця 2.1. Порівняння коефіцієнта ефективності в режимах (3-1) та (3-3)

Коефіцієнт ефективності	PZT-5H
k_{31}^2 , режим (3-1)	0.26
k_{33}^2 , режим (3-3)	0.83

В цілому, виходячи з різних властивостей, поперечний режим, як видається, демонструє кращу продуктивність, але складне виготовлення і високі витрати роблять поздовжній режим більш сприятливим.

2.2. Режими вібрації кантилеверної балки

Кантилеверна балка може мати багато різних режимів вібрації, кожен з різною резонансною частотою. Перший режим вібрації має найнижчу резонансну частоту і, як правило, забезпечує найбільший відхилення і, отже, електричну енергію. [12] Тим не менш, потрібна менша резонансна частота, тому що її більш близька за частотою до фізичних джерел вібрації і взагалі більша потужність виробляється на нижчих частотах. Таким чином, віброгенератори зазвичай призначені для роботи в першому резонансному режимі.

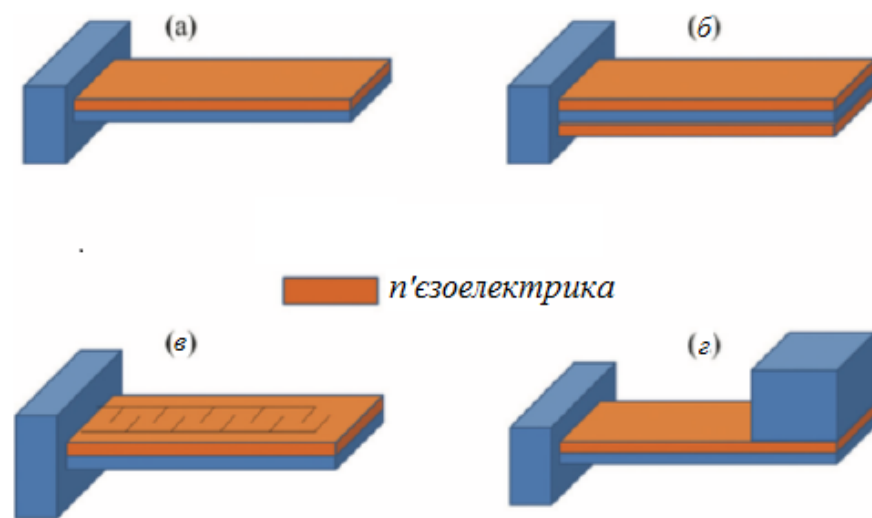


Рис.2.2. Різні конфігурації п'єзоелектричних кантилеверів: (а) уніморф; (б) біморф; (в) п'єзоелектричний кантилевер з міжзубчатими електродами; (г) п'єзоелектричний кантилевер з стійкою масою на своєму вільному кінці.

Для підвищення вихідної енергії в режимі (3-3) для більш високого енерговиділення в консольних балках може бути використана конструкція міжзубчатого електрода(в). У цьому методі на п'єзоелектричному елементі встановлені масиви позитивних і негативних електродів, які виготовляються вузькими.[7] Під випромінюванням п'єзоелектричного матеріалу електроди викликають поляризацію п'єзоелектричного елемента в бічному напрямку в порівнянні з нормальною поляризацією, яка є вертикальною. Здійснюючи цей процес, напрямок напруги паралельно напрямку поляризації, коли п'єзоелектричний елемент перебуває під напругою. Деформація знаходиться в максимумі в затиснутому кінці кантилевера і коли п'єзоелектричний елемент йде

далі від затиснутого кінця, напруга зменшується. Таким чином, не вся довжина п'єзоелектричного елемента бере участь у виробництві електроенергії.

Потужність, що генерується в консольних балках, залежить не тільки від розташування п'єзоелектричного елемента і його форми, а також від розташування прикладеної сили. Згідно з дослідженням, балка з довжиною, шириною, товщиною 0,5, 0,05 і 0,04 відповідно з п'єзоелектричним матеріалом з довжиною, шириною і товщиною 0,05, 0,05, $0,5 \times 10^{-3}$ м відповідно, встановленим на нього піддавалися силі, рівній 1 Н. Силу прикладали на різні частини балки[6]. Наступні результати показують, як вихідна енергія може змінюватися в залежності від розташування прикладеної сили і розташування п'єзоелектричного матеріалу (PZT).

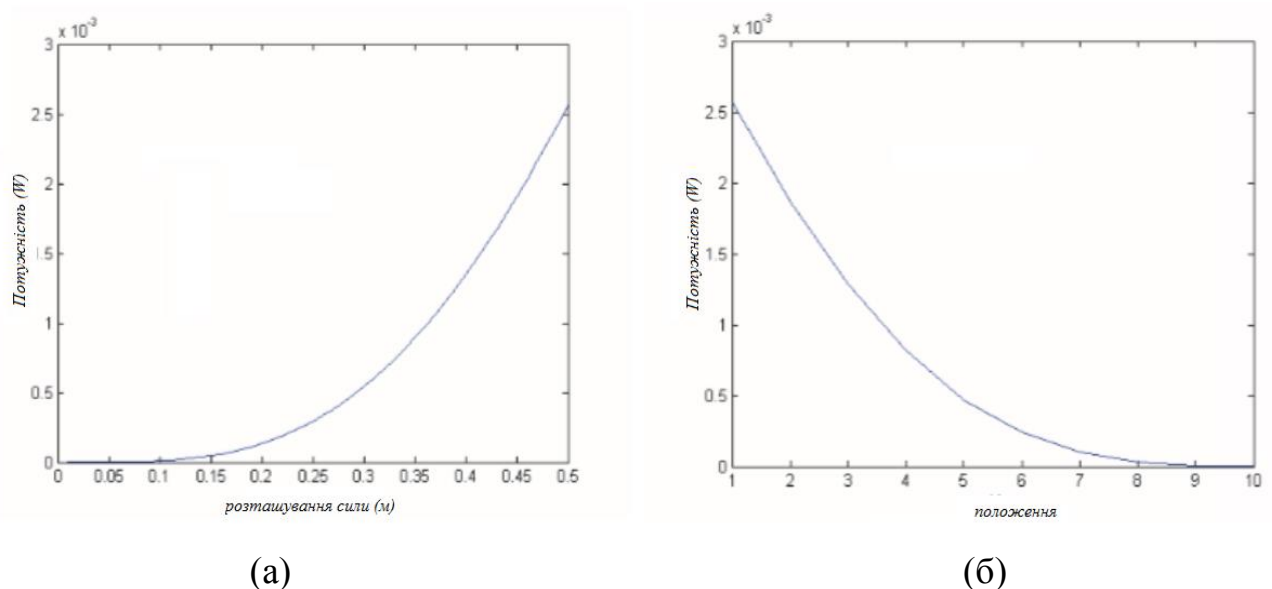


Рис.2.3. (а) Потужність у порівнянні з розташуванням прикладеної сили; (б) потужність у порівнянні з положенням п'єзоелектричного матеріалу, встановленого на консольній балці.

Як показано на графіках, максимальна потужність 2,6 мВт була отримана при розташуванні 0,5 м, який є вільним кінцем балки[9]. Ця потужність є оптимальною потужністю в цій конструкції з силою 1Н і з першою природною частотою 13,4 Гц. Також важливим є розташування п'єзоелектричного матеріалу. Найбільша деформація відбувається на затиснутому краю консольної балки.

2.3. Покращення вихідної потужності п'єзоелектричних генераторів з використанням багатошарових структур

Використання багатошарової структури також є методом для збільшення вихідної потужності п'єзоелектричних генераторів. В своїй роботі Song[11] , порівняв харвестери з одним шаром, двома шарами і п'ятьма шарами. В результаті, зі збільшенням кількості шарів вихідна потужність генераторів зменшилася. Але експериментальні результати не були підтверджені теорією.

Zhu також порівнював вихідну потужність одношарових, двошарових та трьохшарових п'єзоелектричних харвестерів , які мали однакову загальну товщиною п'єзокерамічної пластини.[11] Після експериментів було виявлено, що п'єзоелектричні віброгенератори з багатошаровими структурами підвищували вихідну потужність максимум на 40%, коли всі шари PZT були з'єднані паралельно.

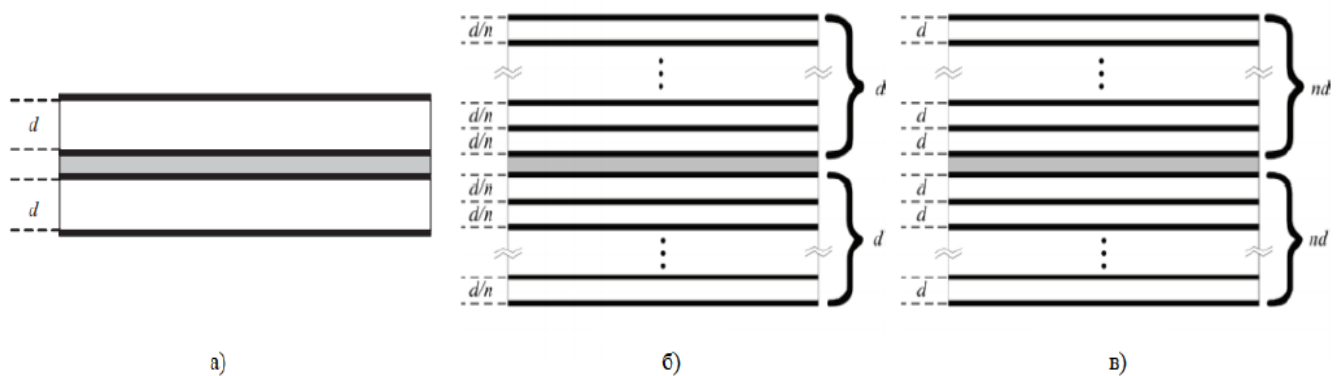


Рис.2.4. (а) одношаровий; (б) перший багатошаровий; (в) другий багатошаровий (з однаковою товщиною)

На рис 2.4. наведено порівняння поперечного перерізу одношарового та багатошарового біоморфного п'єзоелектричного генератора. Шари п'єзокераміки PZT, одношарового і багатошарового генератора, мають рівну загальну товщину, d . Допустимо що товщина кожного шару п'єзокераміки становить d/n , так як всі шари мають рівну товщину, а загальна кількість шарів n , як бачимо на рис.2.4. б).

Тоді кожний шар п'єзокераміки має товщину однакову в одношарових і багатошарових генераторах, d . Товщина всіх шарів п'єзокераміки у багатошаровому генераторі рівна nd , при загальній кількості шарів – n

Паралельне та послідовне з'єднання шарів п'єзокераміки

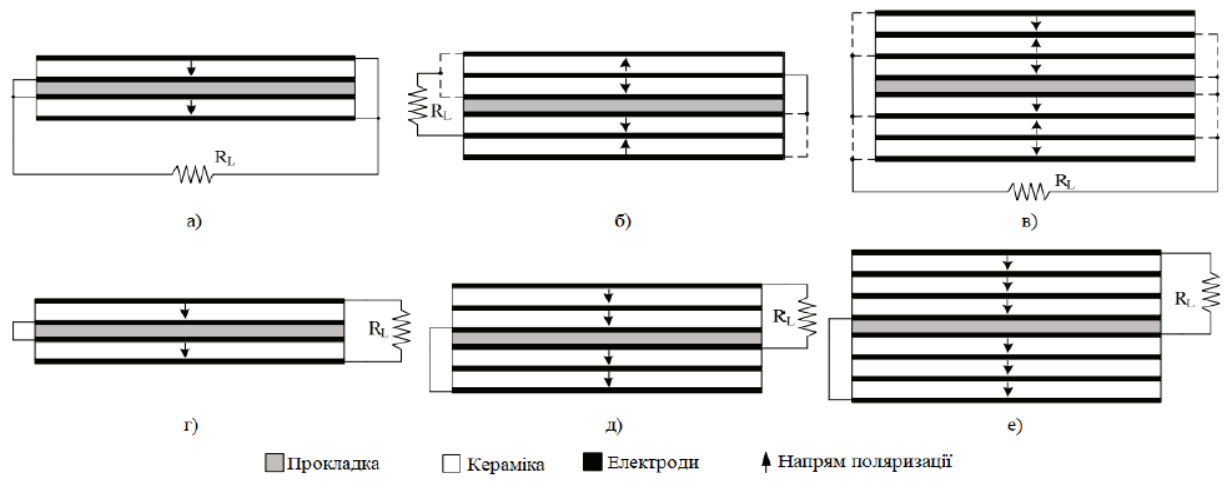


Рис.2.5. З’єднання шарів п’єзокераміки:

Паралельне: одношарова конструкція(а), двошарова конструкція(б), тришарова конструкція(в)

Послідовне: одношарова конструкція(г), двошарова конструкція(д), тришарова конструкція (е)

На зображенні видно паралельні, та послідовні з’єднання одношарових та багатошарових віброгенераторів. Всі способи з’єднання приводять до різних ємностей пристрою, в наслідок, маємо різні оптимальні опори навантаження[14].

Таблиця 2.2 Порівняльні значення вихідної потужності в двох випадках

	Паралельне з’єднання		Послідовне з’єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	1	1
2-шарова конструкція	1.37	2.22	1.17	3.42
3-шарова конструкція	1.18	4.56	1.4	6.63

У таблиці 2.2 наведено результати моделювання та порівняння вихідної потужності, оптимального опору навантаження та напруги розімкнутого

ланцюга, в різних випадках. В результаті бачимо що вихідна потужність зростає кількістю шарів п'єзокераміки, за виключенням випадку паралельного з'єднання, коли у двошарового генератора більш висока вихідну потужність, ніж у тришарового.

Також, генерований заряд має різні розподіли, при умові якщо п'єзоелектричні шари, пов'язані різним чином, і це впливає на значення вихідної потужності генератора.

П'єзоелектричний генератор при послідовному підключенні, у більшості випадків, має більш високу вихідну потужність. Також, оптимальний опір навантаження обернено пропорційний ємності приладу. Напряга розімкненого ланцюга[10], який підключаються до електричного навантаження, пропорційна ефективній товщині між двома основними електродами (таблиця 2.3):

Таблиця 2.3. Порівняльні значення отриманої вихідної напруги

	Паралельне з'єднання		Послідовне з'єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	4	4
2-шарова конструкція	1/4	1/2	4	8
3-шарова конструкція	1/9	1/3	4	12

У відкритого контурі напруга пропорційна ефективній товщині, між двома основними електродами, що підключаються до електричного навантаження

Таблиця 2.4. Порівняльна таблиця отримання вихідної напруги

	Паралельне з'єднання		Послідовне з'єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	2	2
2-шарова конструкція	1/2	1	2	4
3-шарова конструкція	1/3	1	2	6

Висновки до розділу 2

Одним із основних напрямів подальшого підвищення енергоефективності п'єзоелектричного харвестера є використання більш ефективних п'єзоелектричних матеріалів з застосуванням різних п'єзоелектричних конфігурацій (наприклад, режим 31 або режим 33), використання різних механічних структур та використання адаптивних енергозберігаючих пристроїв.

Кантилеверна балка є однією з конфігурацій, має перспективні можливості для підвищення енергоефективності[13] . Згідно з дослідженнями, п'єзоелектричний матеріал, прикріплений до вібраційних структур, дає максимальну електричну потужність, коли вони збуджуються на їх першій природної частоті, де вони відчувають найбільший прогин. Це також можна зробити, приєднавши масу до кінця балки, щоб вона могла відхиляти промінь на частоті, яка відповідає п'єзоелектричному матеріалу.

Досліджено доцільність збільшення вихідної потужності вібраційних п'єзоелектричних комбайнів з використанням багат шарових структур. Результати моделювання показують, що вихідна потужність п'єзоелектричного генератора може бути підвищена за допомогою багат шарової структури в незалежності від того, як підключені шари[8]. Оптимальний опір навантаження нижче, при паралельному підключенні, а напруга у відкритому ланцюзі, при послідовному з'єднанні шарів п'єзокераміки - вище.

РОЗДІЛ III. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЕЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ.

3.1. Схематична модель харвестерів та енергетичний баланс системи

Оскільки генератор п'єзoeлектричної енергії збуджується при синусоїдальній силі, де перша власна частота викликає генератор максимальної потужності з малим переміщенням і руху є лінійними, він може бути змодельований механічно - маємо інерційну масу m , яка підвішена на пружині із жорсткістю k_s , що створює резонансну систему. Незакріплений кінець балки що гармонічно рухається під впливом зовнішньої вібрації, зміщення якого відносно положення рівноваги позначене $z(t)$. Механічне демпфування (внаслідок тертя, опору повітря, тощо) виступає коефіцієнтом тертя d . Для деформування перетворювача використовується рух маси. На його поверхні з'являються електричні заряди, що стимулюють появу електричної напруги $u(t)$. Через навантаження тече струм $i(t)$, під дією напруги, внаслідок відбувається перетворення механічної енергії в електричну. Перетворювач здійснює відновну силу F_e на інерційну масу, внаслідок електромеханічного зворотного зв'язку[5]. Робота, що виконує інерційна маса проти відновної сили, перетворюється на електричну енергію.

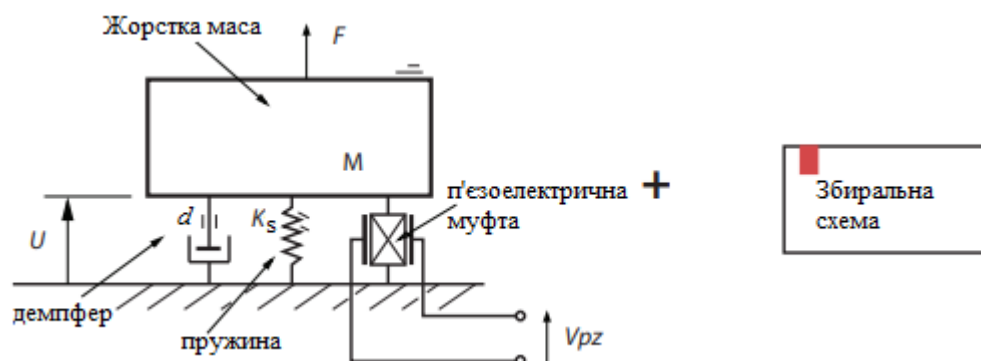


Рис.3.1. Механічне представлення п'єзoeлектричної системи

У цій механічній моделі пружина і демпфер являють собою жорсткість структури і механічні втрати системи відповідно. Сила (F) являє собою зовнішню

силу, прикладену до маси. Згідно з законом Ньютона, масова модель пружини може бути записана так:

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + F_e \quad (3.1)$$

де $a = A_m \sin(\omega t)$ значення миттєвого прискорення зовнішньої вібрації

Відновна сила F_e та струм $i(t)$ можуть бути представлені співвідношеннями :

$$\begin{cases} F_e = k_p z + nu \\ i = n\dot{z} - C\dot{i} \end{cases} \quad (3.2)$$

де $-k_p$ жорсткість п'єзоматеріалу; C - вихідна ємність; n - коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного перетворювача.

Ці величини визначаються виразами

$$k_p = \frac{bh}{ls_{11}^E}; C = (\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}b}{s_{11}^E}) \frac{bl}{h}; n = \frac{d_{31}b}{s_{11}^E} \quad (3.3)$$

де b, l, h - геометричні розміри пластини п'єзоелектричного перетворювача; d_{31} , d_{31} , ϵ_{33}^T , ϵ_{11}^E - п'єзоелектрична стала деформації, пружна піддатливість при постійній напруженості електричного поля, діелектрична стала відповідно [11].

Після підстановки (3.2) в (3.3), отримаємо лінійну схемну модель п'єзоелектричного віброгенератора напруг, яку можемо описати системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + nu \\ i = n\dot{z} - C\dot{i} \end{cases} \quad (3.4)$$

де $k = k_p + k_s$ - сума коефіцієнтів жорсткості п'єзоелектричної та механічної структури.

Запишемо енергетичний баланс системи віброгенератора, що отримаємо шляхом домноження рівняння (3.4) на швидкість $\dot{z}(t)$ та проінтегрувавши рівняння по часу:

$$\underbrace{\int (m a \dot{z}) dt}_{\text{загальна енергія}} = \underbrace{\frac{1}{2} m \dot{z}^2}_{\text{кінетична енергія}} + \underbrace{\int (d \dot{z}^2) dt}_{\text{пружна енергія}} + \underbrace{\frac{1}{2} k z^2}_{\text{еластична енергія}} + \underbrace{\int (n u \dot{z}) dt}_{\text{електрична енергія}} \quad (3.5)$$

де

$$\int (n u \dot{z}) dt = \frac{1}{2} C u^2 + \int u i dt \quad (3.6)$$

З виразу (3.5) видно, що введена в систему енергія, включає в себе кінетичну енергію, втрати механічного демпфування, енергії пружності та енергію що перетворена на електричну енергію[9]. Згідно з (3.6) електрична енергія ділиться на енергію, що зберігається на п'єзоелектричній ємності та яка споживається електричним навантаженням.



Рис 3.2. Еквівалентне ланцюгове представлення п'єзоелектричного генератора

Момент інерції (I) для структурної балки, що складається з трьох шарів, описується наступним чином:

$$I = \left[\frac{b t_p^3}{12} + b t_{sh} w^2 \right] + \frac{\eta_s b t_{sh}^3}{12} \quad (3.7)$$

де η_s - відношення пружності PZT і латуні, t_p і t_{sh} - товщина PZT і латунного шару, w - Ширина керамічного / п'єзоелектричного матеріалу

Момент і середнє напруження в балці визначаються наступним чином;

$$M(x) = m(\ddot{y} + \ddot{z})(l_b + \frac{1}{2}l_m - x) \quad (3.8)$$

3.2. Електромеханічні коефіцієнти зв'язку та загасання

Ефективний коефіцієнт зв'язку - це параметр, що допомагає порівнювати різні збірні конструкції використовуючи будь-який п'єзоелектричного матеріал. Внаслідок електромеханічного зворотного зв'язку п'єзоелектричний віброгенератор має дві резонансні частоти, в залежності від електричного навантаження. Коли п'єзоелектричні термінали харвестера короткозамкнені визначається фундаментальна резонансна частота

$$\omega_{sc} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.9)$$

Частота антирезонанснута вища, ніж фундаментальна резонансна частота, і відображається у конфігурації з відкритою схемою:

$$\omega_{oc} = \omega_{sc} \sqrt{1 + k_{eff}^2} \quad (3.10)$$

k - загальна жорсткість, яка складається з механічної структури та п'єзоелектричного матеріалу, тоді як k_{eff}^2 - квадратний ефективний фактор електромеханічного зчеплення[10]. Електромеханічне демпфування, для основної та антирезонансної частоти, що здійснюється відповідним електричним навантаженням (тобто $R_H = 0$ для основної частоти і $R_H = \infty$ для антирезонансної частоти), дорівнює нулю.

Рівняння що корелює коефіцієнт електромеханічного з ефективним фактором електромеханічного зчеплення:

$$k_{eff}^2 = \frac{n^2}{kC} \quad (3.11)$$

Коефіцієнт зв'язку п'єзоелектричного перетворювача є важливим параметром, адже він є мірою для частини введеної механічної енергії,

що перетворюється в електричну енергію. Підвищення коефіцієнт зв'язку означає, те що із заданої механічної енергії середовища можна зібрати велику кількість енергії.

Для п'єзоелектричного матеріалу, квадратний коефіцієнт зв'язку визначається наступним чином:

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (3.12)$$

k_{31}^2 залежить тільки від п'єзоелектричних властивостей матеріалу.

Квадратний коефіцієнт зв'язку k_{31}^2 становить 0,7. Для зв'язування коефіцієнта зчеплення матеріалу k_{31}^2 та узагальненого електромеханічного коефіцієнта зчеплення n , що має залежність від геометричних параметрів кантилевера:

$$k_{31}^2 = \frac{n^2}{k_p C} \quad (3.13)$$

При описанні загальної структури харвестера (наприклад, геометрію резонатора) замість властивостей п'єзоелектричного шару, можна використовувати ефективний коефіцієнт зчеплення:

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad (3.14)$$

ω_{oc} та ω_{sc} називають кутовими резонансними частотами відкритої та короткозамкнутої схеми відповідно.

3.3 Виведення вихідного імпедансу

Опис п'єзоелектричних біморфних генераторів з використанням електричного ланцюга, заснованої на електромеханічній аналогії, показаний на рис. 3.2, і була отримана шляхом злиття розподіленої енергії, що зберігається, і енергії, розсіяної в системі, в елементах схеми. Коли композитна балка піддається механічному навантаженню, деформація, індукована в п'єзоелектричному матеріалі, генерує напругу, яка являє собою перетворення з механічної в електричну енергію; це перетворення пояснюється ідеальним

трансформатором і його коефіцієнтом повороту.[12] Зазначимо також, що вихідна потужність п'єзоелектричного генератора є функцією величини механічного входу.

Як і в електричному колі, керуючі рівняння потоку визначаються за допомогою законів Кірхгофа та закону напруги. З якого випливає,

$$\sigma_{in} = L_m \ddot{S} + R_b \dot{S} + \frac{S}{C_k} + nV \quad (3.15)$$

$$i = C_b \dot{V} + V / R \quad (3.16)$$

де σ_{in} - Вхідна напруга, L_m - Еквівалентна індуктивність, яка представляє масу,

C_k - Еквівалентна ємність, що представляє собою механічну жорсткість,

C_b - Ємність п'єзоелектричного згину

n - коефіцієнт повороту, V – напруга.

У рівняннях (3.15) і (3.16) точка являє собою першу похідну, а подвійна точка - другу похідну. Щоб ці вирази були придатними до використання, отримаємо еквівалентні вирази :

$$n = \frac{-ad_{31}c_p}{2t_c} \quad (3.17)$$

$$R_b = k_1 k_2 b_m \quad (3.18)$$

$$L_m = k_1 k_2 m \quad (3.19)$$

$$C_b = \frac{a^2 \epsilon w l_e}{2t_c} \quad (3.20)$$

$$C_k = c_p^{-1} \quad (3.21)$$

де, d_{31} - П'єзоелектричний коефіцієнт деформації

c_p - Еластичний модуль п'єзоелектричного матеріалу

t_c - Товщина керамічного / п'єзоелектричного матеріалу

ω - Уявна частина комплексної частотної змінної

l_e - Довжина електрода в п'єзоелектричному генераторі

Струм, що утворюється в результаті механічного напруження, що визначається при нульовому електричному полі, задається як:

$$i = a w l_e d_{31} c_p \dot{S} \quad (3.22)$$

Перетворенням Лапласа змінимо рівняння деформації, отримаємо

$$S = \frac{a \varepsilon}{t_c d_{31} c_p p} \left(p + \frac{1}{RC_b} \right) V \quad (3.23)$$

p - Нормована комплексна змінна частоти

Для отримання електричного вхідного опору для мережі, спочатку ми посилаємося на механічну сторону мережі як на основну, а електричну - на вторинну[10]. Далі використаємо рівняння (3.13) і (3.14), щоб отримати вираз для вхідного електромеханічного імпедансу Z_{in} ,

$$Z_{in}(p) = \frac{V_{in}(p)}{i_{in}(p)} = \frac{\sigma_{in}(p)}{i(p)} \quad (3.24)$$

Після декількох підстанов, отримаємо:

$$Z_{in}(p) = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(pL_m + R_b + \left(\frac{1}{pC_k} \right) + n\beta \right) \quad (3.25)$$

$$\text{де } \beta = \frac{a\varepsilon}{t_c d_{31} c_p}, \text{ та } \alpha = a w l_e d_{31} c_p$$

Рівняння (3.25) являє собою електромеханічний вхідний опір п'єзоелектричного кантилевера.

Вхідний опір описує динамічну поведінку п'єзоелектричного генератора.

3.4 Розрахунок вхідної та вихідної потужності

З даними рівняннями, можна обчислити вихідну потужність, якщо вхідна потужність відома. Аналогічно, вхідна потужність може бути обчислена, якщо вихідна потужність відома.

Для визначення вхідної потужності передбачається, що при резонансі, мережі, рис.3.3, буде збуджуватися. Зауважимо, що при резонансі уявна частина імпедансу стає нульовою і імпеданс стає суто реальним (тобто резистивним). Таким чином, потужність, що подається на первинну схему при резонансі, регулюється тільки R_b

Оскільки R_b є єдиним компонентом, який регулює потужність, можна сказати, що потужність буде розсіюватися в цьому резисторі[14]. Резистор R_b моделює структурне гасіння п'єзоелектричного генератора і розсіює частину енергію у вигляді тепла. Решта енергії, яка нас цікавить, буде передана на другу сторону мережі виходячи з обчисленого коефіцієнта втрат.

З різною частотою збудження комбайн має дві однакові максимальні точки потужності, як можна побачити на графіку.[9]

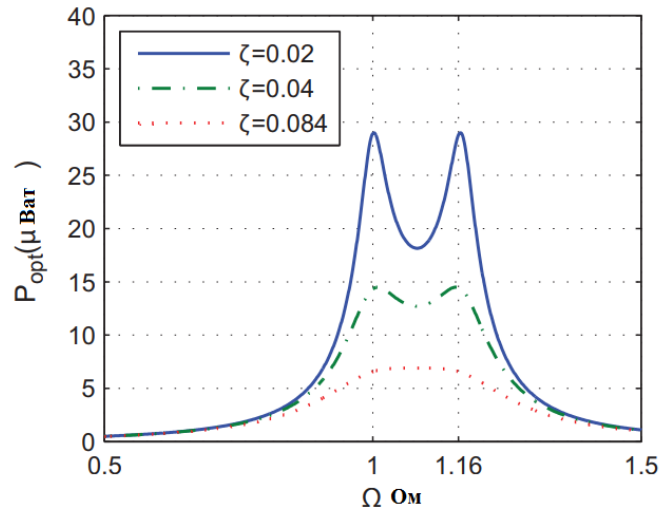


Рис 3.3 Потужності від нормованої частоти з різними коефіцієнтами демпфірування

З теорії електричних кіл добре відомо, що потужність, яка розсіюється в резисторі, обчислюється просто як добуток напруги і струму, або відношення напруги в квадраті до опору. Отже, ми можемо записати потужність, що передається на первинну сторону мережі, як:

$$P_{in} = \sigma_{in} \dot{S} = \frac{\sigma_{in}^2}{2R_b} \quad (3.26)$$

де R_b - резистор, що представляє собою механічне демпфування

Коефіцієнт «2» в рівнянні (3.26) являє собою середньоквадратичне значення, оскільки для синусоїдальної напруги з максимальною напругою V , RMS напруга рівна $V / \sqrt{2}$. При резонансі перша сторона мережі складається тільки з чистого резистора. Тому напруга на всьому опорі точно дорівнює напрузі на вході (або вхідній напрузі), що генерується.

Максимальна передача потужності для п'єзоелектричного комбайна,

$$P_{opt} = (\omega^2 U)^2 \frac{K_E}{8\xi\omega_n^3} = \frac{F^2}{4C} \quad (3.27)$$

3.5 Експериментальна перевірка результатів моделювання

На рис. показано порівняння експериментальних результатів та результатів моделювання для виходу напруги відкритого ланцюгу від мікрогенератора PZT. З рис. видно, що експериментальна вихідна напруга відкритої ланцюга дуже добре збігається з результатами моделювання. Експериментальна резонансна частота для структури становить 95 Гц, а симуляційна резонансна частота - 94 Гц. Максимальна експериментальна напруга становила ~ 22 В (від піку до піку) при ~ 95 Гц, що відповідає свердловині моделі простору, де максимальна напруга (відкрита петля) становила ~ 23 В (пік-пік), при ~ 94 Гц.

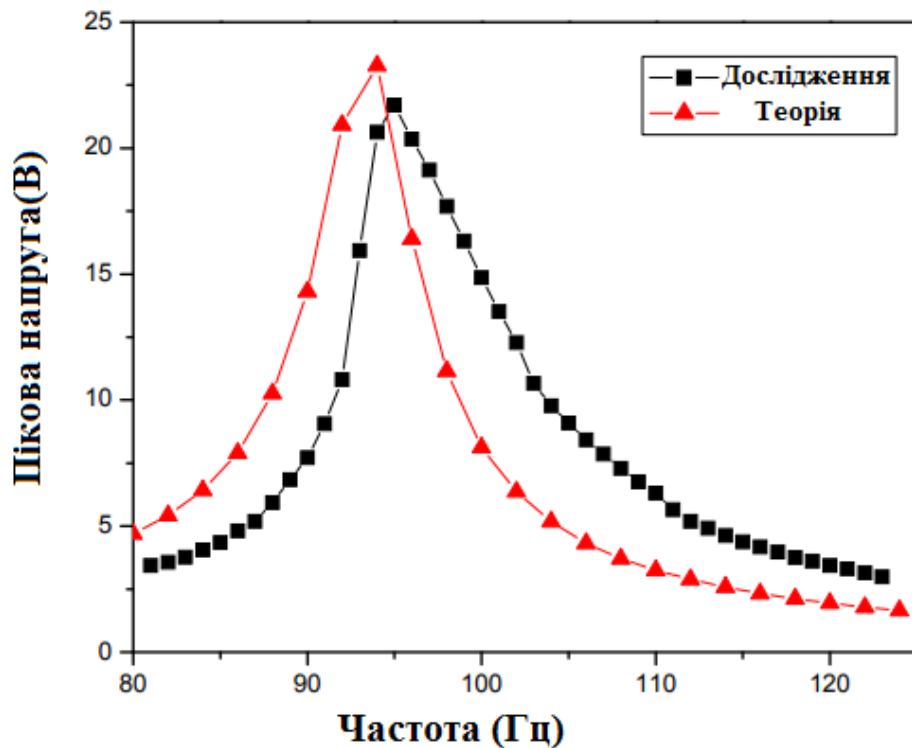
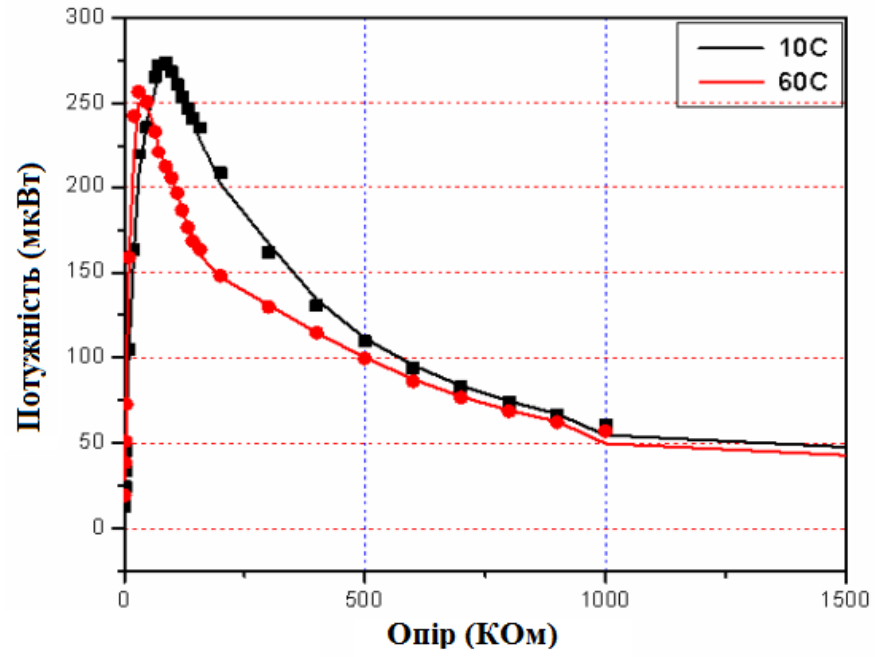


Рис. Порівняння експериментальних і імітаційних результатів для виходу частоти і напруги.

Рис. Вихідна активна потужність проти опору навантаження для PZT кантилевера при різних температурах



Таблиця 3.1 Параметри та властивості матеріалу

Параметри	Значення
c_p	62 ГН/м ²
c_{sh}	66ГН/м ²
w	3.2мм
ϵ	1800
t_c	0.134мм
t_{sh}	0.132мм
l_e	25.60мм
m	0.5894Г
ξ	0.02
g	9.8м/с ²
d_{31}	-1.9e-10 м/В
k_{31}	0.32

Для отримання вихідної потужності значення елементів схеми лишилось порахувати використовуючи інформацію про значення в таблиці 3.1.[9] Для обчислення вхідного опору використовували рівняння (3.25).

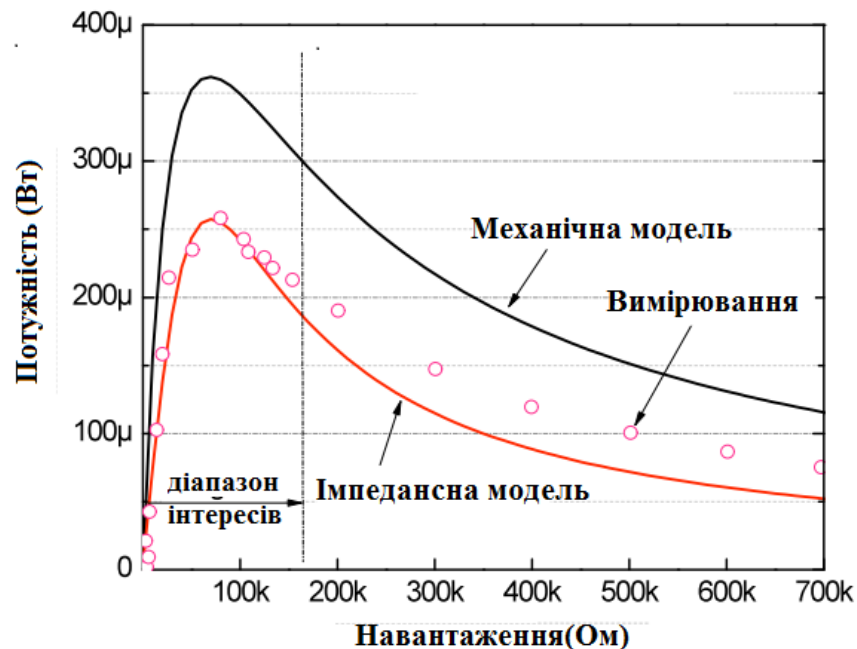


Рис 3.5 Накладені результати моделювання та результати вимірювань

Як видно з рис. 3.5, представлена модель яка добре слідує за виміряною поведінкою. Видно невідповідність, тем не менш, були декілька очікуваних факторів, включаючи невизначеність в геометрії пристрою, допустиме відхилення відомих властивостей матеріалу, труднощі при точному визначенні коефіцієнта гасіння. Також зазначимо, що запропонована модель є лінійною, тому що вона використовує тільки лінійні (пасивні) елементи кола[11]. Для врахування нелінійності п'єзоелектричного шару повинна використовуватися ланцюгова модель вищого порядку. Враховуючи простоту впровадженого методу та складність завдання, дана модель є ефективним методом подальшого моделювання п'єзоелектричних біморфів, особливо, коли вигин біморфу не великий, що означає нелінійність у градієнтах напруг не є серйозними (але присутній).

При визначенні співвідношення між P_{in} і P_L краще використовувати коефіцієнт втрат, тобто P_{in} / P_L , оскільки ефективність п'єзоелектричних матеріалів зазвичай низька, як відомо. Можна використовувати визначення коефіцієнта підсилення, тобто P_L / P_{in} . Однак, коефіцієнт підсилення більш підходить для використання, коли відношення P_L / P_{in} більше, ніж одиниця, що означає, що відбувається посилення. Коли коефіцієнт підсилення менше одиниці, то це випадок ослаблення.

Висновки до розділу 3

1. Провели дослідження схемної моделі п'єзоелектричного віброгенератора напруги типу кантилевер, описали схемну модель системою рівнянь, введена в систему енергія, включає в себе кінетичну енергію, втрати механічного демпфування, енергії пружності та енергію що перетворена на електричну енергію.

2. Досліджені різні параметри п'єзоелектричних харвестерів, такі як електромеханічні коефіцієнти зв'язку та загасання, вхідний імпеданс. Коефіцієнт зв'язку п'єзоелектричного перетворювача є важливим параметром, адже він є мірою для частини введеної механічної енергії, що перетворюється в електричну енергію. Підвищення коефіцієнт зв'язку означає, те що із заданої механічної енергії середовища можна зібрати велику кількість енергії.

3. Представлено новий метод оцінки вихідної потужності п'єзоелектричних генераторів на основі електромеханічної аналогії, що включає електромагнітну теорію та теорію енергетичних систем. Ввели формули для розрахунку вхідної та вихідної потужності, вхідного електромеханічного імпеданс. Точність моделі порівнювали по тимчасовій характеристиці при прискоренні пристрою і вольт-амперній характеристиці, а також по генерованій потужності при різному резистивному навантаженні. Експериментальні дані збігаються з теоретичними.

ВИСНОВКИ

В ході виконання бакалаврської роботи були зроблені такі висновки та результати

Збирання енергії вібрації являє собою величезний потенціал для комерційних застосувань у різних областях . П'єзоелектрична кераміка є одним з найбільш відомих матеріалів в області п'єзоелектрики та енергозбору, за рахунок низької вартістості, систематизації та кращої п'єзоелектричній властивості, в порівнянні з іншими п'єзоелектричними матеріалами.

П'єзоелектричний генератор може виробляти відносно високі вихідні напруги, але тільки при низьких електричних струмах. Також у п'єзоелектричних матеріалів основними перевагами є щільність потужності і простота використання.

На відміну від електромагнітних, п'єзоелектричні пристрої можуть бути як в макромасштабі, так і мікромасштабі через це вони найкраще поєднується з технологією МЕМС-процесів, за допомогою дугового п'єзоматеріалу

В процесі роботи розглянули новий напружено-застосований режим на п'єзоелектричній енергії кругового діафрагмового п'єзоелектричного генератор, відмінністю між старим і новим комбайнами є їхні різні режими навантаження.

Підвищення ефективності п'єзоелектричних віброгенераторів напруги можливо різними способами: користування пристроїв з багатошаровою структурою, використання ефективних п'єзоелектричних матеріалів з різними конфігураціями, (наприклад, поздовжній або поперечний режим), використання масового інерційного наконечника для підтримки власної частоти.

Представлено новий метод оцінки вихідної потужності п'єзоелектричних генераторів на основі електромеханічної аналогії, що включає електромагнітну теорію та теорію енергетичних систем. Ввели формули для

розрахунку вхідної та вихідної потужності, вхідного електромеханічного імпедансу. Дана модель є ефективним методом подальшого моделювання п'єзоелектричних біморфів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Генерація електроенергії [Електронний ресурс] // Вікіпедія - вільна енциклопедія. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генерация_электроэнергии
2. П'єзогенератори. Пристрій і принцип дії. Застосування і особливості [Електронний ресурс] // ЕЛЕКТРОСАМ.РУ. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/pezogeneratory>
3. Поняття енергії. Основні види енергії [Електронний ресурс] // msd.com.ua – Режим доступу до ресурсу: <http://msd.com.ua/osnovy-energoberezeniya/ponyatie-energii-osnovnye-vidy-energii/>
4. Farid Ullah Khan, Izhar (2015) Stan suchasnogo zboru akustychnoi energii [State of the art in acoustic energy harvesting]. Journal of Micromechanics and Microengineering (electronic journal), <http://iopscience.iop.org/journal/0960-1317>
5. S Roundy¹ and P K Wright² A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics
6. Anton, S.R. and Sodano, H.A. 2007. “A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006),” Smart Materials and Structures, 16: R1-R21.
7. Badel, A., Guyomar, D., Lefeuvre, E. and Richard, C. 2005. “Efficiency Enhancement of A Piezoelectric Energy Harvesting Device in Pulsed Operation by Synchronous Charge Inversion,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16(10): 889-901.
8. A Review on Mechanisms for Piezoelectric-Based Energy Harvesters
Hassan Elahi , ID , Marco Eugeni and Paolo Gaudenzi. Published: 14 July 2018

8. Jeon, Y.B., Sood, R., Jeong, J.H., and Kim, S., MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sensors & Actuators A*, 122, 2005. P 16–22.

9. Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters

Journal of intelligent material systems and structures, vol. 20—december 2009

Yaowen yang* and lihua tang

10. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions

Renato Calio^{1,*}, Udaya Bhaskar Rongala¹, Domenico Camboni¹, Mario Milazzo¹, Cesare Stefanini¹, Gianluca de Petris² and Calogero Maria Oddo^{1,*} Published: 10 March 2014

11. Zhu M, Worthington E and Njuguna J 2009 Analyses of power output of piezoelectric energy-harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 56 1309

12. Ajitsaria J, Choe S Y, Shen D and Kim D J 2007 Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation *Smart Mater. Struct.* 16 447–54.

13. Analyses of Power Output of Piezoelectric Energy Harvesting Devices Directly Connected to a Resistive Load Using a Coupled Piezoelectric-Circuit Finite Element Method Meiling Zhu^{1*}, Emma Worthington¹ and James Njuguna² ¹Department of Materials, ²Department of Sustainable Systems Cranfield University, Bedfordshire, MK43 0AL UK

14. Modeling and characterization of piezoelectric energy harvesting systems with the pulsed resonant converter. Alex geoffrey phipps